



הרשות הלאומית
לבטיחות בדרכים



מודל חיזוי להערכת נפח תנועת הולכי הרגל במרחב העירוני



- פרופ' יצחק אומר
- אוניברסיטת תל אביב
- ד"ר יודן רופא
- אוניברסיטת בן-גוריון בנגב



ניהול מדעי: ד"ר שי סופר, המדען הראשי, הרשות הלאומית לבטיחות בדרכים
ליווי מחקרי: אגף מחקר, הרשות הלאומית לבטיחות בדרכים

דצמבר 2013 | סבט תשע"ד



הרשות הלאומית
לבטיחות בדרכים



מודל חיזוי להערכת נפח תנועת הולכי הרגל במרחב העירוני



- פרופ' יצחק אומר
- אוניברסיטת תל אביב
- ד"ר יודן רופא
- אוניברסיטת בן-גוריון בנגב



ניהול מדעי: ד"ר שי סופר, המדען הראשי, הרשות הלאומית לבטיחות בדרכים
ליווי מחקרי: אגף מחקר, הרשות הלאומית לבטיחות בדרכים

דצמבר 2013 | טבט תשע"ד

מידע כללי

המחקר מומן ע"י הרשות הלאומית לבטיחות בדרכים, חטיבת המידע והמחקר

תאריך הגשת הדו"ח: 30.4.2013

תאריך תחילת המחקר: 1.3.2012

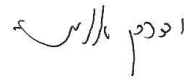
שם החוקר הראשי: פרופ' יצחק אומר

שם חוקר (ראשי) נוסף: ד"ר יודן רופא

מוסד המחקר: אוניברסיטת תל אביב / אוניברסיטת בן גוריון

שם המחקר (עברית): מודל חיזוי להערכת נפח תנועת הולכי הרגל במרחב העירוני

Research Title (English): A Prediction Model for Pedestrian Movement in Urban Space



חתימת החוקר הראשי:

חתימות החוקרים השותפים:



חתימה:

1. שם החוקר: יודן רופא

תקציר

מטרתו של מחקר זה היתה לבנות מודל לחיזוי ההליכה ברגל בשכונות וערים בישראל, עם דגש על ילדים וקשישים שהם אוכלוסיות פגיעות במיוחד מבחינת תאונות דרכים של הולכי רגל. המודל מתבסס על משתנים המתארים מבנה המרחב הפיזי של העיר, שימושי הקרקע הרלוונטיים ליצירת תנועה ברגל, ונתונים דמוגרפיים. לצורך המחקר נבחרו 14 שכונות בארבע ערים שונות בישראל, נאספו הנתונים למשתנים השונים, והתבצעה מדידה מדגמית של הולכי הרגל לפי חלוקתם לקבוצות האוכלוסיה השונות. לאחר מכן נבנה מודל רגרסיה רב משתנים המסביר את ההתפלגות של התנועה ברגל. בשלב האחרון של המחקר, כדי לתקף את המודל, השתמשנו בו כדי לחזות את תנועת הולכי הרגל בארבע שכונות נוספות.

הממצאים מראים, כי לא ניתן לבנות מודל עירוני אחד החוזה היטב את תנועת הולכי הרגל, אלא יש לבנות מודלים כאלה לכל שכונה בנפרד. ככלל, למעט במקרה של העיר באר-שבע, המשתנים המבטאים את המרכזיות והאינטגרציה המרחבית של קטעי רחוב, משפיעים יותר על התפלגות תנועת הולכי הרגל מהמשתנים המתארים את שימושי הקרקע וזאת לכל קבוצות האוכלוסיה ובמיוחד לילדים. מנגד, בזמן שהמודלים חוזים היטב את תנועת כלל האוכלוסיה, ואוכלוסיית הקשישים (בערכי מתאם של בין 0.5 ל-0.8), תנועת ילדים היא כנראה אקראית יותר ורמת המתאם של המודלים איתה היא נמוכה הרבה יותר (בין 0.2 ל-0.4). יתר על כן, זיהינו שלושה טיפוסים שכונות מובהקים מבחינת התפלגות תנועת הולכי הרגל והיכולת לחזות אותה: שכונות מרכז עיר וקצה שנבנו בשיטת תכנון קדם-מודרנית מצד אחד, ושכונות שתוכננו בשיטת תכנון מודרנית תוך שימוש במערכי רחוב הירארכיים ומתפצלים, ומיקום מרכז השכונה בליבתה. המודל שפיתחנו עובד היטב מבחינת יכולת ההסבר שלו את תנועת הולכי הרגל בשכונות מרכז העיר ושכונות הקצה לכלל האוכלוסיה ולאוכלוסיית הקשישים (קורלציות של R^2 של 0.78-0.84), וקצת פחות טוב לאוכלוסיית הילדים (R^2 של 0.75 לשכונות מרכז העיר ו-0.44 לשכונות קצה קדם-מודרניות), ואינו מסביר היטב את התפלגות התנועה בשכונות המודרניות (R^2 של 0.47 לכלל האוכלוסיה, 0.60 לקשישים ו-0.40 לילדים).

בשלב התיקוף מצאנו כי בעוד שהמודל שבנינו מסוגל לחזות היטב את התנועה בשכונות מרכזיות המתוכננות על בסיס רשת רחובות קדם-מודרנית לכל קבוצות האוכלוסיה (מתאמי פירסון הנעים בין 0.53 ל-0.77), אך לא הצלחנו להגיע לחיזוי טוב של התנועה בשכונות קצה של ערים. יש צורך במחקר נוסף שיתמקד בשכונות אלה, שיתבסס על תצפיות נוספות וארוכות יותר של תנועת הולכי הרגל, ויבדוק משתנים אפשריים נוספים – כדי לראות אם ניתן בכלל לבנות מודל מהימן להליכה ברגל בשכונות קצה ושכונות מודרניות.

מבחינה יישומית, ניתן לבנות מודל תנועה גנרי עבור הולכי רגל בשכונות מרכזיות בעלות רשת רחובות קדם-מודרנית (הממוקמות בערים מישוריות) וזאת רק על סמך מידע גיאוגרפי על רשת הדרכים, שימושי הקרקע ומידע דמוגרפי, שזמינים כיום בכל עיר בישראל. מודל כזה יכול לסייע בעיקר בזיהוי מתאם בין מקומות בהם יש נוכחות רבה של הולכי רגל קשישים וילדים לבין מקומות מסוכנים מבחינת תחבורתית שבהם אין התחשבות מספקת בהולכי רגל. זיהוי כזה יכול לאפשר ואף לעודד נקיטת פעולות המתחשבות במגבלות פיזיות וקוגניטיביות של ילדים וקשישים בניסיון להפחית את מידת פגיעותם.

תקציר מנהלים

רקע

המחקר עסק בפיתוח מודל לחיזוי נפח תנועת הולכי רגל בעיר ברמת הרחוב עם התייחסות מיוחדת להולכי רגל ילדים וקשישים. מידע על כמות הולכי הרגל ברחובות העיר ועל הרכבה הדמוגרפי חיוני לפעולות שמטרתן להפחית את היפגעותם של הולכי רגל בישראל בכלל, ושל אוכלוסיית ילדים וקשישים בפרט. בעזרת מידע כזה ניתן לדוגמא לזהות מקומות מסוכנים מבחינת תחבורה שבהם מסלולים של הולכי רגל ילדים וקשישים מצטלבים עם צמתים וצירי תחבורה ראשיים שבהם אין התחשבות מספקת בהולכי רגל.

מידע על כמות הולכי רגל אינו זמין. ספירות תנועה של הולכי רגל כמעט ואינן מתבצעות בישראל. גם כאשר מתבצעות ספירות תנועה של כלי רכב, שאף הן נערכות בהיקף מוגבל, אין הן כוללות ספירות תנועה של הולכי רגל. מכל מקום, ספירות תנועה כרוכות בהשקעה תקציבית רבה, ובכל מקרה אין אפשרות מעשית לספור הולכי רגל בכל רחובות העיר. מכאן הנחיצות בפיתוח מודל כזה והרציונל לביצוע המחקר.

הנחת המחקר היא, שכיום, בזכות הידע האמפירי שנצבר במקומות שונים בעולם בכל הקשור למאפייני הסביבה העירונית שיש להם פוטנציאל השפעה על תנועת הולכי רגל ובזכות התפתחות טכנולוגיית המידע הגיאוגרפי ושיטות לניתוח הסביבה העירונית שפותחו לאחרונה, קיימת אפשרות לפתח מודל לחיזוי תנועת הולכי רגל. הניסיונות שנערכו עד כה בעולם לבנות מודלים לחיזוי תנועה מצביעים על מידה רבה של הצלחה.

ישנן עדויות רבות לגבי השפעת מיקום שירותים ומוסדות ציבור על דפוסי תנועת הולכי רגל בעיר. כך לדוגמא, ידוע שמסלולי הליכה של ילדים וקשישים מוכתבים במידה רבה, ואף ניתנים לחיזוי על פי היחס המרחבי בין בית המגורים לבין מערך שימושי קרקע תפקודיים כגון גן ילדים, בית ספר, פארק, מסחר ומוסדות ציבור. בנוסף לכך, ישנן גישות מחקר חדשות יחסית, כדוגמת הגישה של 'תחביר המרחב' (space syntax) עליה בין השאר מתבסס מחקר זה, הטוענות להשפעה דומיננטית של מבנה רשת הדרכים על דפוסי תנועה של הולכי רגל ועל התפלגותה בהתאם לרמת האינטגרציה ודרגת המרכזיות ברשת הדרכים. כך לדוגמא, בסביבה עירונית שרשת הרחובות שלה מקושרת היטב, כדוגמת דגם רחובות של שתי וערב, יש סיכוי לתנועת הולכי רגל רבה יותר בהשוואה לרשת דרכים הבנויה בצורה היררכית, שבה התנועה מתפלגת לרוב על פי מרכזיות הרחובות.

חיזוי התפלגות נפח התנועה תלוי בזמינות של נתונים על מקום המגורים של האוכלוסיה והרכבה הדמוגרפי, על התפרסות גיאוגרפית של מערך התפקודים הרלוונטי לכלל האוכלוסייה, לילדים ולקשישים ועל רשת הדרכים. בזכות התפתחות טכנולוגיית המידע הגיאוגרפי, נתונים גיאוגרפים זמינים כיום לכל ישוב במדינת ישראל ברמת פירוט של מבנה מגורים. בעזרת נתונים אלה ובאמצעות שיטות מתקדמות לניתוח טופולוגי, גיאומטרי ומטרי, שפותחו לאחרונה ניתן לחשב את דרגות האינטגרציה והמרכזיות של כל רחוב ברשת הרחובות בעיר, וכל זאת לצד מידע גיאוגרפי מדויק על שימושי הקרקע בכל רחוב, ומידע על גודל, צפיפות והרכב אוכלוסיה בכל אזור בעיר.

מטרת המחקר היא אם כן לפתח מודל גנרי לחיזוי נפח תנועת הולכי רגל תוך התחשבות במאפיינים הייחודיים של סביבות מגורים בערים בישראל, עם התייחסות מיוחדת לילדים וקשישים. פיתוח המודל נעשה על סמך מידע גיאוגרפי ודמוגרפי זמין הרלוונטי לחקירת תנועת הולכי רגל.

בהתבסס על ידע אמפירי שהתקבל מערים שונות בעולם ועל סמך ידע על המבנה של ערים בישראל ותיפקודן אנו משערים שלסביבות מגורים עירוניות בישראל תהינה השפעה שונה על התפלגות נפח התנועה של הולכי רגל וזאת בהתחשב בהבדלים הקיימים ביניהן בכל הנוגע למערך שימושי הקרקע ולמאפיינים

מורפולוגיים, הכוללים גם דגמי רחובות שונים עם מבנה שונה של רשת דרכים, ולתכונות דמוגרפיות. הבדלים אלה מקורם בתקופת ההקמה של השכונות, בגישת התכנון לפיה הן הוקמו ובאופיין של הערים בהן ממוקמות. לכל אלה קשר למרכיבים במערכת העירונית העשויים להשפיע על תנועת הולכי רגל - מערך שימושי הקרקע, מבנה רשת הדרכים, צפיפות אוכלוסיה והרכב דמוגרפי.

שיטה

המחקר נערך על ארבע עשרה שכונות מגורים המייצגות את המרחב העירוני בישראל: ארבע שכונות בכל אחת מהערים כפר-סבא ובאר-שבע; ושלוש שכונות בכל אחת מהערים אשדוד ובת-ים. ערים אלו הוקמו בתקופות שונות ונבדלות זו מזו בגישות לפיהן תוכננו. הבדלים אלה המאפשרים להבחין בשתי קבוצות של שכונות שנבדלות בדגם הרחובות שלהן ובמערך המרחבי של שימושי קרקע אך דומות במיקומן ביחס למרכז העיר. בקבוצה האחת שכונות מרכזיות הקרובות או משמשות כמרכז העיר ובשנייה שכונות קצה המרוחקות ממרכז העיר. בכל אחת מהערים נאסף מידע גיאוגרפי מדויק על רשת הדרכים, שימושי קרקע ברמת מבנה המגורים ומידע דמוגרפי ברמת האזור הסטטיסטי (החלוקה המינהלית לאזורים סטטיסטיים היא החלוקה המפורטת ביותר לפיה הלשכה המרכזית מפרסמת נתונים). המידע הגיאוגרפי על רשת הדרכים ועל שימושי הקרקע הסתמך על מחלקות ממ"ג (מערכת מידע גיאוגרפי) בעירויות ועל חברת "מפה". למידע על רשת הרחובות בעיר נוספו גם שבילי הולכי רגל אשר מופו באמצעות עבודת שטח ובעזרת תצלומי אוויר שחשרו במידע הגיאוגרפי הקיים. המידע הדמוגרפי מקורו בלשכה המרכזית לסטטיסטיקה, בעיקר במפקד האוכלוסין והדירור לשנת 2008.

לחישוב דרגת המרכזיות נעשה בשימוש שיטת תחביר המרחב (Space Syntax). לצורך זה לכל עיר ושכונת מגורים נבנתה בשלב ראשון מפת קווי ציר (axial map) על בסיס רשת הרחובות. קווי הציר מייצגים קווי ראייה במרחב הציבורי, ומדמים את האופן שבו הולכי רגל רואים את הסביבה העירונית ברמת הרחוב. על בסיס קווי ציר אלה זה חושבו מדדי מרכזיות מקובלים שנמצאו בספרות המחקרית כרלוונטיים לחיזוי תנועת הולכי רגל. המידע על התפלגות דרגות המרכזיות ואינטגרציה ברשת הרחובות מופה, ולצדו מופו שימושי הקרקע לסוגיהם תוך התחשבות בשימושי קרקע הרלוונטיים במיוחד לילדים וקשישים כדוגמת בתי ספר ובתי אבות.

על סמך המידע שנאסף, חושב ומופה, נערכה דגימה של מקטעי רחוב (סגמנטים) תוך התייחסות לצורך לייצג את מירב המגוון של דרגות מרכזיות ושימושי הקרקע. במקטעים אלה נערכו ספירות תנועה (239 מקטעי רחוב בסה"כ). בכל אחת מהערים התבצעה ספירת התנועה במקביל בכל המקטעים ובאותן שעות. המדידה נעשת בשיטת ה"שערים" שלפיה, המודד עומד בנקודה ברחוב וסופר את כל מי שעובר קו דמיוני החוצה את הרחוב במקום שבו הוא עומד. משך המדידה בכל מקטע רחוב ארך 5 או 10 דקות. את המדידות ביצע צוות של מודדים שספרו ידנית במשך חמש שעות במקטעים הנבחרים. בכל ספירה נערכה הבחנה בין ילדים קשישים ואוכלוסיה בגיל ביניים.

המידע על נפח התנועה שנמדד באמצעות ספירות תנועת הולכי רגל יחד עם המידע הגיאוגרפי על רשת הדרכים, שימושי קרקע בעיר וצפיפות אוכלוסיה, שימשו לבניית מודל רגרסיה רבת משתנים לחיזוי נפח התנועה על סמך המתודולוגיה המקובלת בספרות המדעית. בניית המודל לחיזוי נעשתה בשאיפה להציע מודל גנרי שיהיה ניתן ליישמו במרחבים עירוניים מגוונים ללא צורך בספירת הולכי רגל, או לכל הפחות להביאה למינימום הכרחי.

בכל מודל רגרסיה רבת משתנים שנבנה במהלך המחקר, המשתנים התלויים הם נפחי תנועת הולכי הרגל הממוצעת במקטע רחוב (סגמנט) במשך שעה. המשתנים הבלתי תלויים נחלקים לשלוש קטגוריות: (א) משתנים מרחביים המייצגים את תכונות המרכזיות של מקטע רחוב ברשת הדרכים כדוגמת דרגת

קישוריות לרחובות הסמוכים ולסביבות גיאוגרפיות ברדיוס התייחסות שונה; (ב) משתנים המייצגים את שימושי הקרקע הממוקמים במקטע, ו-ג) משתנים דמוגרפיים.

על פי תוכנית המחקר, נבנו מודלים לחיזוי על סמך 14 שכונות מגורים מייצגות שנבחרו בשלב החקירה. מודלים אלה נבחנו "בשלב התיקוף" כדי להעריך את רמת החיזוי שלהם וכדי לברר עד כמה ניתן ליישם כמודלים גנריים במגוון שכונות מגורים בערים בישראל, וזאת רק על סמך מידע גיאוגרפי על רשת הדרכים, התפלגות שימושי הקרקע בעיר, צפיפות והרכב אוכלוסייה, וללא צורך בספירות תנועה.

ממצאים עיקריים ומסקנות

תוצאות הספירות מגלות שקיימים הבדלים משמעותיים בכמות הולכי הרגל בין הערים והשכונות בתוכן – נפח תנועת הולכי הרגל במקטע רחוב בשעה עומד על ממוצע של כ-430 הולכי רגל בבת-ים בעוד שבבאר-שבע הוא עומד על ממוצע של כ-110 הולכי רגל. בערים כפר סבא ואשדוד נע הממוצע סביב כ-200 הולכי רגל בשעה למקטע רחוב. הערים שונות גם בהתפלגות תנועת הולכי הרגל בין שכונות ובתוך השכונות כתוצאה מהבדלים תפקודיים ומורפולוגיים. התפלגות תנועת הולכי רגל של ילדים וקשישים מגלה ככלל דפוס שונה בהשוואה לכלל האוכלוסייה. הן נוטות להתרכז במקומות מסוימים וזאת כאשר ילדים מגלים נוכחות רבה יותר בשוליים של שכונת המגורים בעוד שלקשישים נוכחות רבה יותר ברחובות מרכזיים עם שימושי קרקע מסחריים. כל אלה מרמזים על השפעה דיפרנציאלית של הסביבה העירונית על הרכבה הדמוגרפי של תנועת הולכי הרגל.

חקירה אינטנסיבית של הגורמים המשפיעים על התפלגות תנועת הולכי רגל מלמדת על השפעת המורפולוגיה של רשת הדרכים, תכונות שימושי הקרקע, ותכונות דמוגרפיות על התפלגות תנועת הולכי רגל של קבוצות האוכלוסייה שנבחנו במחקר זה – ילדים, אוכלוסייה בוגרת, וקשישים. יחד עם זאת, משקלן של תכונות אלה נמצא שונה בהתאם לעיר או לקבוצת האוכלוסייה הנבדקת. ככלל, נמצא שלמשתנים המרחביים השפעה חזקה יותר מאשר לשאר קבוצות המשתנים. יחד עם זאת, למשתנים המרחביים המייצגים מרכזיות ברשת הדרכים בטווחים קצרים (בין 250-750 מ') השפעה חזקה יותר על תנועת הקשישים והילדים.

באופן כללי ניתן לקבוע שממצאי החקירה עולים בקנה אחד עם ממצאים אמפיריים ממחקרים קודמים שעסקו בגורמים המעורבים בהתפלגות נפח תנועת הולכי רגל במקומות שונים בעולם. יחד עם זאת, לעיר הישראלית, כפי שמתברר במחקר הנוכחי, ייחוד משלה שניכר בהבדלים המורפולוגיים והתפקודיים בין ערים, ושכונות מגורים במסגרתן, שמקורם העיקרי בגישת התכנון לפיה הוקמו.

הניסיון לבנות מודל רגרסיה לחיזוי בכל אחת מהערים בנפרד מראה על הצלחה חלקית – בערים כפר סבא, בת ים ואשדוד רמת החיזוי (מקדם קורלציה R^2) מובהקת ונמצאה גבוהה מ-60% אך בבאר שבע רמת החיזוי נמצאה נמוכה מ-40%. יתירה מכך, יכולת חיזוי תנועת הולכי רגל לילדים וקשישים נוטה להיות נמוכה בהשוואה לכלל האוכלוסייה. על סמך תוצאות אלה ניתן להסיק שמודל לחיזוי נפח תנועת הולכי הרגל ברמת העיר, שנבנה על סמך נתונים אמפיריים במקטעי רחוב מדגמיים (כ-60 מקטעי רחוב בממוצע לעיר במחקר הנוכחי) פוטנציאל ניבוי גבוה, אך הוא אינו מספק כדי לשמש כלי אופרטיבי לניבוי בכל הערים ובכל קבוצות האוכלוסייה.

על סמך בחינה ויזואלית וסטטיסטית אינטנסיבית של התפלגות נפח התנועה של הולכי הרגל ב-14 שכונות המגורים, ותוך התחשבות בהתפלגות שימושי הקרקע ובהתפלגות המרחבית של דרגות המרכזיות הטופולוגיות והמטרית ברשת הדרכים, ובמידת ההתאמה בין שתי התפלגויות אלו, התברר שקיימת שונות רבה בין טיפוס שכונות מגורים בכל הקשור למשתנים המשפיעים על תנועת הולכי רגל, ולמשקלם היחסי.

בעקבות מסקנה זו, גובשה מסגרת מתודולוגית לבניית מודל לחיזוי נפח תנועת להולכי רגל המתאימה במיוחד לקונטקסט העירוני בישראל. מסגרת זו מאפיינת שלושה טיפוסים של שכונות מגורים: שכונות ותיקות שתוכננו בגישת תכנון קדם-מודרנית וממוקמות במרכז העיר; שכונות ותיקות שתוכננו בגישת תכנון קדם-מודרנית וממוקמות בשולי העיר; ושכונות חדשות שהוקמו בגישת תכנון מודרנית שממוקמות הן בערים החדשות והן בשולי הערים הוותיקות.

לצורך בחינת יכולת הניבוי של כל אחד מטיפוסי השכונות נבנה מודל רגרסיה ליניארית רבת משתנים בשיטת 'Backward' לכל אחת מקבוצות האוכלוסיה. דרך הניתוח בשיטה זו, מהווה מענה לבעיה של מולטיקולינאריות – קשר ליניארי בין המשתנים הבלתי תלויים, הן המרחביים והן התפקודיים – שנמצאה בניסיון להסביר את תנועת הולכי הרגל שנבדקו. ערכי מקדם הקורלציה של המודלים מלמדים שניתן לחזות את תנועת הולכי הרגל של כלל האוכלוסיה ברמה של R^2 הגבוהה מ-0.60 וזאת בכל טיפוסי השכונות. לעומת זאת, רמת החיזוי תנועת הולכי רגל ילדים נוטה להיות נמוכה יותר; מלבד במרכזי הערים הוותיקות שם יכולת הניבוי גבוהה ומספקת בהחלט ($R^2 = 0.75$), רמת הניבוי נמוכה יחסית נמצאה גם בשכונות הממוקמות בשולי הערים הוותיקות והן בשכונות החדשות שממוקמות בערים ותיקות וחדשות, שעומדת על 0.44 ו-0.40, בהתאמה.

תיקוף המודלים שגובשו לכל אחד מטיפוסי השכונות נערך בשתי שכונות נוספות בכפר סבא (שנכללה בשלב האמפירי של בניית המודל) ושתי שכונות בהוד השרון (שלא נכללה בו). שכונות אלה מייצגות שניים מטיפוסי השכונות שאותו בשלב הקודם: שכונה ותיקה שתוכננה בגישת תכנון קדם-מודרנית הממוקמת במרכז העיר, ושכונה חדשה שהוקמה בגישת תכנון מודרנית וממוקמת בשולי העיר. בכל אחת מהערים כפר סבא והוד השרון, נבחרה שכונה אחת מכל טיפוס. בכל אחת מהערים והשכונות שנכללו בשלב התיקוף התבצעו כל שלבי איסוף הנתונים והניתוח שנערכו לגבי 4 הערים ו-14 השכונות שנבחנו בשלב המחקר. במקרה זה, החלנו על השכונות את המודלים שנבנו בשלב הראשון של המחקר, כדי לחזות את כמות הולכי הרגל ברחובותיהן, והשווינו את התוצאות של המודלים למדידה של כמות התנועה בפועל.

מתברר כי קיים הבדל ברור ומשמעותי בין השכונות הממוקמות במרכזי הערים כפר סבא והוד השרון לבין השכונות שממוקמות בקצה ערים אלו. רמת החיזוי נמצאה משמעותית רק בשכונות הממוקמות במרכז העיר. כאשר החיזוי נערך לכלל האוכלוסיה מתקבל מקדם קורלציה (R^2) של 0.60 בכפר סבא ו-0.56 בהוד השרון. לעומת זאת, בשכונות הקצה הערכים נמוכים יחסית באופן משמעותי ומקדם הקורלציה נע בטווח 0.11 – 0.24, בהתאמה. הפער ברמת החיזוי בין טיפוסי השכונות אף מחריף כאשר מדובר על אוכלוסיית הקשישים והילדים. מקדם הקורלציה של המודלים שנבנו לאוכלוסיות אלו בשכונות המרכז עומד בהתאמה על 0.30 ו-0.31 בכפר סבא, ועל 0.28 ו-0.42 בהוד השרון. בשכונות הקצה לעומת זאת, נע ערכו של מקדם הקורלציה (R^2) בטווח של 0.05-0.21. רמת החיזוי הנמוכה יחסית של אוכלוסיות הילדים והקשישים נחלשת אם כן, כאשר מדובר על שכונות קצה שהוקמו בגישת תכנון מודרני.

את ההסבר לרמת החיזוי הדיפרנציאלית של המודל אנו מציעים לייחס לשני הבדלים עיקריים בין טיפוסי השכונות: מידת ההתאמה בין התפלגות דרגת המרכזיות להתפלגות שימושי הקרקע, וכמות התנועה המועטה יותר והנראית אקראית יותר בשכונות קצה. לשכונות שהוקמו בגישת התכנון הקדם-מודרנית מאפיינים הקרובים למבנה המורפולוגי-תפקודי המתפתח בערים שהתפתחו באופן הדרגתי לאורך ההיסטוריה ובתהליך אורגני, שאחד ממאפייניו הבולטים הוא ההתאמה בין התפלגות דרגת המרכזיות ברשת הדרכים לבין התפלגות שימושי הקרקע המהווים גורמי משיכה לתנועת הולכי רגל. בהתחשב ביחס התלות בין שתי ההתפלגויות, ניתן להניח שיש להתאמה זו השפעה ישירה על נפח התנועה. דהיינו, תנועת הולכי רגל זוכה להעצמה בזכות מרכזיות הרחוב וגם בזכות שימושי הקרקע, ולכך תרומה ליכולת חיזוי

ההתפלגות של תנועת הולכי רגל. לעומת זאת, בשכונות קצה שתוכננו בגישת תכנון מודרנית ההתאמה בין שתי ההתפלגויות נמוכה יחסית ואפשר שימושי קרקע אטרקטיביים לתנועת הולכי רגל לא מוקמו ברחובות המרכזיים אלא ברחובות פחות מרכזיים. חוסר העקביות בהתאמה באה לידי ביטוי בחוסר יכולת מודל הרגרסיה לחזות תנועת הולכי רגל ברמה מספקת. שנית, בעוד שנפח התנועה בשכונות מרכז העיר גדול, יציב ועקבי, בשכונות הקצה התנועה חלשה ולא יציבה לאורך זמן ונפח התנועה ברחובות מסוימים עשוי להגיע לכדי הולכי רגל אחדים בלבד במשך שעה. לכך פוטנציאל השפעה על יכולת הניבוי הסטטיסטי. בעיה זו מחריפה כאשר מדובר על תנועת הילדים והקשישים שחלקם בנפח התנועה קטן עוד יותר.

על סמך הערכת המודלים הגנריים לחיזוי נפח תנועת הולכי רגל שנבנו לטיפוסי שכונות מגורים בישראל ניתן להסיק שניתן לנבא בצורה משמעותית ומספקת תנועת הולכי רגל בטיפוס אחד של שכונות – שכונות ותיקות הממוקמות במרכז העיר. ואולם, כפי ששלב התיקוף שנערך בכפר סבא והוד השרון מלמד, יכולת הניבוי של המודל לחיזוי נפח תנועת הולכי רגל בשכונות מגורים שממוקמת בעיר שנכללה במחקר האמפירי שעליו התבססה בנייתו של מודל זה דומה לשכונות מגורים שלא נכללה במחקר האמפירי; יכולת הניבוי בשכונה בהוד השרון (שלא נכללה במחקר האמפירי) אינה שונה מהותית מיכולת הניבוי בשכונה בכפר סבא (שנכללה במחקר האמפירי). כך גם המצב לגבי השכונות החדשות – אין הבדל מהותי בין השכונה הממוקמת בכפר סבא לזו הממוקמת בהוד השרון. המשמעות היא שיכולת הניבוי של תנועת הולכי רגל אינה מותנית במחקר אמפירי בעיר בה ממוקמת השכונה (מחקר שכולל גם ספירות תנועה) אלא רק בטיפוס השכונה. יחד עם זאת, ממצא זה צריך למצוא לו ביסוס בעזרת יישום המודל הגנרי בשכונות ותיקות נוספות תוך הקפדה על גיוון של שכונות מטיפוס זה. ביסוס כזה יהווה כמובן בשורה חשובה המצביעה על אפשרות לבניית מודל גנרי ללא צורך באיסוף נתונים אמפיריים.

המסקנה הכללית של המחקר היא שהדרך להשגת מודל גנרי לחיזוי תנועת הולכי רגל אינה בפיתוח מתודולוגיה שתחייב ספירות תנועה בכל עיר או שכונת מגורים בהן יש לנו עניין להעריך ולחזות נפח תנועת הולכי רגל, אלא בניסיון לגבש מודל גנרי מתאים יותר לטיפוסי השכונות השונים. לצורך זה נדרש מחקר אינטנסיבי שיכלול מגוון רחב של שכונות פריפריאליות שבהן תתבצענה ספירות תנועה בהיקף גדול. מחקר כזה יאפשר להתרכז ביחס שבין המאפיינים המורפולוגיים של רשת הדרכים למערך שימושי הקרקע, העומד ביסוד תיפקודן של שכונות מגורים מטיפוס זה.

השלכות יישומית

ממצאי מחקר זה אינם מספיקים איפוא כדי להציע מודל גנרי לחיזוי נפח תנועה בכל טיפוסי השכונות. ואולם, האפשרות לבנות מודל גנרי עם רמת חיזוי משמעותית של תנועת הולכי רגל, ובכלל זה ילדים וקשישים, לטיפוס שכונות מסוים וללא צורך בספירות תנועה הוכחה במחקר זה. המשמעות היא שניתן ליישם את המתודולוגיה שגובשה במחקר זה לצורך חיזוי אופרטיבי.

כדי ליישם מודל גנרי מדויק ומתאים לכל טיפוס שכונה, נדרש מחקר אינטנסיבי נוסף שיכלול מגוון רחב של שכונות פריפריאליות שבהן תתבצענה ספירות תנועה בהיקף גדול, שיתרכז במאפייני הסדר המורפולוגי והתפקודי של שכונות מגורים מטיפוס זה, ובעיקר ביחס בין התפלגות מרכזיות ברשת הדרכים להתפלגות שימושי קרקע רלוונטיים לתנועת הולכי רגל. אף שבמסגרת המחקר הנוכחי יושמו שיטות החקירה המתקדמות ביותר בתחום של תנועות הולכי רגל, מחקר כזה מחייב גם פיתוח שיטת לניתוח אינטגרציה מרחבית בגישה המתאימה לייצוג ייחודן המורפולוגי של שכונות מגורים חדשות שהוקמו בגישת תכנון מודרנית, כדוגמת סגירותן המרחבית.

מכל מקום, מודל גנרי לחיזוי שעבר את שלב התיקוף, ניתן ליישום בצורה נוחה עם השקעת משאבים מינימלית (בהשוואה לביצוע ספירות תנועה) וזאת רק על סמך מידע גיאוגרפי על רשת הדרכים ושימושי הקרקע ומידע דמוגרפי, שזמינים כיום בכל עיר בישראל.

מודל כזה יכול לסייע לפעולות שמטרתן להפחית תאונות דרכים ואף ליישומים מקיפים יותר הבוחנים את הקשר בין תנועת כלי רכב לתנועת הולכי רגל והשלכותיהם על תנאי הבטיחות. כפי שצוין ברציונל לביצוע המחקר, למודל לחיזוי תנועת הולכי רגל חשיבות מיוחדת לגבי אוכלוסיית הילדים והקשישים ובעיקר בזיהוי מתאם בין מקומות בהם יש נוכחות רבה של הולכי רגל קשישים וילדים לבין מקומות מסוכנים מבחינת תחבורתית שבהם אין התחשבות מספקת בהולכי רגל, ובילדים וקשישים במיוחד. זיהוי כזה יכול לאפשר ואף לעודד נקיטת פעולות המתחשבות במגבלות פיזיות וקוגניטיביות של ילדים וקשישים בניסיון להפחית את פגיעותם, כדוגמת התקנת שילוט מתאים, תכנון רמזורים (משך שהות הרמזור), אמצעים להערכת מרחקים, הגבלת מהירות תנועה ברחוב וכד'.

בנוסף לכך, ובהקשר רחב יותר, מודל לחיזוי תנועת הולכי רגל יכול לשמש כלי עזר חיוני בתכנון וביצוע מדיניות תחבורתית המשלבת תחבורה ממונעת ורכיבה על אופניים עם תנועה של הולכי רגל במטרה למנוע קונפליקטים וליצור התאמה והשלמה הדדית ביניהן.

ראוי גם לציין שהמודלים של חיזוי תנועת הולכי רגל שנבנו כאן, המסתמכים על ספירות תנועה ידניות, שהן לעת עתה המדויקות ביותר בהשוואה למקורות אחרים, אך הם יכולים להשתלב עם טכנולוגיות מידע שעשויות להוות מקור מידע נוסף על תנועת הולכי רגל כדוגמת טלפונים ניידים מבוססי GPS ומצלמות שמוצבות ברחבי העיר.

תוכן עניינים

1	מבוא	1
2	הרקע המדעי – חיזוי נפח תנועת הולכי רגל עם התייחסות לילדים וקשישים	2
2	2.1 תנועת הולכי רגל בעיר	2
6	2.2 תנועת הולכי רגל ילדים וקשישים	6
7	2.3 חיזוי תנועת הולכי רגל	7
8	2.4 הגישה המבנית והניתוח הטופולוגי של תחביר המרחב – Space Syntax	8
11	2.5 גורמים נוספים המשפיעים על תנועת הולכי רגל	11
13	2.6 קטגוריזציה של דגם הרחובות	13
13	2.7 החשיבות של חיזוי כמות הולכי הרגל לבטיחות בדרכים סיכום	13
15	2.8 סיכום	15
16	3 מתודולוגיה	16
16	3.1 כללי	16
16	3.2 שיטות וכלי מחקר	16
19	3.3 איסוף מידע גיאוגרפי	19
23	4 תוצאות	23
23	4.1 התפלגות תנועת הולכי רגל	23
24	4.2 שלב החקירה ובניית מודל להערכה וחיזוי של נפח תנועת הולכי רגל	24
28	4.3 איתור קטגוריות לטיפוסי שכונות מגורים	28
32	4.4 בניית מודלים לחיזוי לקטגוריות השונות של טיפוסי שכונות מגורים	32
34	4.5 שלב התיקוף	34
42	4.6 סיכום	42
43	5 מסקנות	43
45	6 ביבליוגרפיה	45
50	נספחים	50
63	תקציר באנגלית	63

רשימת איורים:

3. איור 2.1: קנה מידה של מרחבים ציבוריים.....
4. איור 2.2: סוגי חזיתות.....
9. איור 2.3: דוגמא של בניית מפת צירים על סמך רשת הרחובות בסביבה עירונית.....
10. איור 2.4: דגמים של רשת רחובות.....
15. איור 2.5: השוואה בינלאומית של שיעור הרוגים הולכי רגל בקבוצות אוכלוסייה שונות.....
17. איור 3.1: הערים והשכונות הנבחרות.....
18. איור 3.2: תיאור בניית מודל לחיזוי נפח תנועת הולכי רגל.....
20. איור 3.3: התפלגות שימושי הקרקע בעיר בת ים.....
21. איור 3.4: מפות מקטעים (segment maps) מבוססות קווי ציר (axial lines); בעיר כפר סבא.....
21. איור 3.5: מפות מקטעים (segment maps) מבוססות קווי ציר (axial lines); בעיר באר שבע.....
23. איור 4.1: התפלגות נפח תנועת הולכי רגל על פי ערים, שכונות מגורים וקבוצות אוכלוסייה.....
24. איור 4.2: התפלגות תנועת הולכי רגל בערים.....
30. איור 4.3: קטגוריה A: שכונות שתוכננו בגישת תכנון קדם-מודרנית וממוקמות במרכז העיר.....
31. איור 4.4: קטגוריה B: שכונות שתוכננו בגישת תכנון קדם-מודרנית וממוקמות בפריפריה של העיר.....
31. איור 4.5: קטגוריה C: שכונות שהוקמו בגישת תכנון מודרנית.....
- איור 4.6: התאמה בין דרגת האינטגרציה ברשת הרחובות (אינטגרציה מקומית) לבין התפלגות שימושי הקרקע בשכונה ותיקה (קטגוריה A) ובשכונה חדשה (קטגוריה C).....
32. איור 4.7: השכונות הנבחרות לשלב התיקוף בערים הוד השרון וכפר סבא.....
35. איור 4.8: תנועת הולכי רגל בשכונות מגורים במרכז כפר סבא ובמרכז הוד השרון – מדידה לעומת ניבוי מודל חיזוי (כלל האוכלוסייה).....
38. איור 4.9: תנועת הולכי רגל בשכונות הקצה במרכז כפר סבא ובמרכז הוד השרון - מדידה לעומת ניבוי מודל חיזוי (כלל האוכלוסייה).....
39. איור 4.10: תנועת הולכי רגל בשכונת מרכז כפר סבא – מדידה לעומת ניבוי (קשישים, ילדים ואוכלוסייה בגילאי 15-64).....
- 40.

רשימת טבלאות

- טבלה 3.1 : פריסת, מספור ומיקום השכונות בארבע הערים השונות. 17
- טבלה 4.1 : תיאור המשתנים הבלתי תלויים והתלויים (נפח תנועת הולכי רגל) שנותחו במהלך בניית מודל הרגרסיה וסיווגם לקבוצות. 25
- טבלה 4.2 : תיאור המשתנים הבלתי תלויים הדומיננטיים בהסבר נפח תנועת הולכי רגל על פי חלוקה לקבוצות אוכלוסיה. 26
- טבלה 4.3 : המתאם (מקדם קורלציה R^2) של דרגת מרכזיות ברשת הרחובות והתפלגות שימושי קרקע עם תנועת הולכי רגל ברמת העיר. 27
- טבלה 4.4 : המתאם (מקדם קורלציה R^2) בין מרכזיות ברשת הרחובות והתפלגות שימושי קרקע עם תנועת הולכי רגל – השוואה בין ערים וקבוצות אוכלוסיה. 28
- טבלה 4.5 : מקדם קורלציה (R^2) של מודל הרגרסיה על פי קטגוריות של שכונות וקבוצות אוכלוסיה. 28
- ($P < 0.05$). 33
- טבלה 4.6 : נוסחאות מודל הרגרסיה שחושבו לכל אחד מטיפוסי השכונות ולכל אחת מקבוצות האוכלוסיה במסגרתן – כלל האוכלוסיה, ילדים וקשישים. 33
- טבלה 4.7 : המתאם (מקדם קורלציה R^2) בין מרכזיות ברשת הרחובות והתפלגות שימושי קרקע עם תנועת הולכי רגל – השוואה בין ערים וקבוצות אוכלוסיה ($N=68$). 36
- טבלה 4.8 : הערכת רמת הניבוי של מודל הרגרסיה בשכונות התיקוף. 41

רשימת נספחים:

- נספח 1 : שימושי הקרקע והתפלגות תנועת הולכי רגל בעיר בת ים. 50
- נספח 2 : התפלגות שימושי הקרקע והתפלגות תנועת הולכי רגל בעיר כפר סבא. 52
- נספח 3 : התפלגות שימושי הקרקע והתפלגות תנועת הולכי רגל בעיר אשדוד. 54
- נספח 4 : התפלגות שימושי הקרקע והתפלגות תנועת הולכי רגל בעיר באר שבע. 56
- נספח 5 : מפות מקטעים (segment maps) מבוססות קווי ציר (axial lines). 58
- נספח 6 : ערכי מודל הרגרסיה על פי טיפוסי שכונה (C,B,A) ועל פי קבוצות אוכלוסיה. 60

1. מבוא

אינפורמציה על כמות הולכי הרגל והרכבה הדמוגרפית חיונית לפעולות שמטרתן להפחית את היפגעותם של הולכי רגל בישראל בכלל ושל אוכלוסיית ילדים וקשישים בפרט. בעזרת מידע על תנועת הולכי רגל ילדים וקשישים ניתן לדוגמא לזהות מקומות מסוכנים מבחינת תחבורה שבהם מסלולים של הולכי רגל ילדים וקשישים מתלכדים או מצטלבים עם צמתים וצירי תחבורה ראשיים שבהם אין התחשבות מספקת בהולכי רגל. כמו כן ניתן לנקוט בפעולות המתחשבות במגבלות פיזיות וקוגניטיביות של ילדים וקשישים (ראה למשל: הנדל, 2010) בניסיון להפחית את פגיעותם, כדוגמת התקנת שילוט מתאים, תכנון רמזורים (משך שהות הרמזור), אמצעים להערכת מרחקים, מהירות תנועה ברחוב וכד'. ואולם, אינפורמציה על כמות הולכי רגל אינה זמינה כיום מכיוון שהיא תלויה בקיומן של ספירות תנועה של הולכי רגל שכמעט ואינן מתבצעות בישראל. גם כאשר מתבצעות ספירות תנועה של כלי רכב, שאף הן נערכות בהיקף מוגבל, אין הן כוללות ספירות תנועה של הולכי רגל.

על רקע זה, מטרתו של המחקר הנוכחי היא לפתח מודל לחיזוי נפחי תנועה של הולכי רגל ברמת הרחוב עם התייחסות מיוחדת להולכי רגל ילדים וקשישים. על סמך ידע אמפירי קודם ניתן להניח שמסלולי הליכה של ילדים וקשישים מושפעים במידה רבה הן מהיחס בין בית המגורים לבין מערך שימושי קרקע תפקודיים שכונתיים ועירוניים, כגון גן ילדים, בית ספר, פארק, מסחר ומוסדות ציבור, והן ממבנה רשת הדרכים. אנו מניחים גם שסביבות מגורים עירוניות בישראל יהיו נבדלות בהשפעתן על התפלגות נפח התנועה של הולכי רגל וזאת בהתחשב בגישת התכנון לפיה הן הוקמו ובהתפתחותן, ובאופייה של העיר בה הן ממוקמות. לכל אלה קשר לגורמים העשויים להשפיע על תנועת הולכי רגל - מערך שימושי הקרקע, מבנה רשת הדרכים, צפיפות האוכלוסיה והרכבה הדמוגרפית.

חיזוי התפלגות נפח התנועה תלוי כמובן בזמינות של נתונים על מקום המגורים של האוכלוסיה והרכבה הדמוגרפית, על התפרסות גיאוגרפית של מערך התפקודים הרלוונטי לתנועת הולכי רגל, ובכלל זה לילדים וקשישים, ועל רשת הדרכים. בזכות התפתחות טכנולוגיית המידע הגיאוגרפית, שמדינת ישראל מצטיינת בו באופן יחסי, נתונים אלה זמינים כיום לכל ישוב במדינת ישראל ברמת פירוט של מבנה המגורים. בעזרת נתונים אלה ניתן לחשב את כמות האוכלוסיה לפי קבוצות גיל, את דרגת המרכזיות של רחוב ברשת הרחובות בעיר בעזרת מתודולוגיות ומדידות טופולוגיות, גיאומטריות ומטריות שפותחו לאחרונה למטרה זו, תוך שילובם עם מערך שימושי הקרקע בעיר הרלוונטיים לתנועת הולכי רגל בעיר.

מטרת החקירה היא אם כן לפתח מודל גנרי לחיזוי נפח תנועת הולכי רגל תוך התחשבות במאפיינים הייחודיים של סביבות מגורים בערים בישראל, עם התייחסות מיוחדת לילדים וקשישים. פיתוח המודל נעשה על סמך מידע גיאוגרפי על רשת הדרכים, התפלגות שימושי הקרקע בעיר וצפיפות האוכלוסיה הרלוונטי לחקירת תנועת הולכי רגל. מידע זה שימש תשתית לחקירה אמפירית בה נאספו נתוני אמת על תנועת הולכי רגל בסביבות מגורים מגוונות המייצגות את העיר הישראלית ובכלל זה שכונות שנבדלות בגישת התכנון על פיה הוקמו, בזמן הקמתן, בדגם הרחובות, ובמערך שימושי הקרקע בהן.

השאיפה לבניית מודל כזה נובעת מההכרה בנחיצותו ככלי שיכול לסייע לפעולות שמטרתן להפחית תאונות דרכים ואף ליישומים מקיפים יותר הבוחנים את הקשר בין תנועת כלי רכב לתנועת הולכי רגל והשלכותיהם על תנאי הבטיחות.

2. הרקע המדעי – חיזוי נפח תנועת הולכי רגל עם התייחסות לילדים וקשישים

2.1 תנועת הולכי רגל בעיר

הליכה ברגל בעיר היא הפעולה האורבנית הבסיסית ביותר שהתבצעה ברחבי הערים משחר ההיסטוריה. גם כיום, למרות כל החידושים הטכנולוגיים, בני-האדם ממשיכים ללכת באותה מהירות בה הלכו אבות אבותיהם, דהיינו כארבעה-חמישה קמ"ש. בתכנון העירוני ובפרוייקטים רבים שנבנו במאה ה-20 מקומם של הולכי הרגל נפקד בדרך כלל, ובסופו של דבר נוצרו מרחבים עירוניים שמרקמם פגוע ולוקה בחסר. לאחרונה הולכת וגוברת המודעות לחשיבותה של תנועת הולכי הרגל במרחב העירוני תוך הכרת יתרונותיה הסביבתיים והבריאותיים. הסיבה הסביבתית לעידוד ההליכה ברגל, היא להביא להפחתת התלות באמצעים ממונעים לצרכי ניידות, עם כל המשמעות הסביבתית שלהם: ניצול מקורות אנרגיה מתכלים, פליטות פחמן דו-חמצני ומוזהמים, והשפעות רעש וזיהום אוויר (Cervero and Radisch, 1996; Moudon et al, 1997). הסיבה הבריאותית קשורה למגפת ההשמנה ולתמותה מתאונות דרכים. עידוד ההליכה כחלק מפעילות יומיומית התברר כאמצעי חשוב לאורח חיים בריא יותר (Frank et al, 2006). הבנת הגורמים המשפיעים על תנועת הולכי הרגל חיונית לפיתוח מדיניות לעידוד ההליכה ברגל בערים בישראל. ואכן מחקרים אחדים נערכו להשגתה של מטרה זו, בעיקר מההיבט של בטיחות בדרכים (לסקירה בנושא: Hakkert and Matar, 2007).

מזה שנים רבות נחקרת התנהגות האדם בסביבה הבנויה והדרך שבה האדם נע ממקום למקום. קווין לינץ' (Lynch, 1960) פיתח את המושג קריאות הסביבה (legibility) והראה שסביבה בעלת מאפיינים פיזיים ברורים היא קריאה ומובנת יותר, וקל יותר להתמצא ולנווט בה (wayfinding). גולדג' וסטימסון (Golledge and Stimson, 1997) בחנו את התנהגות האדם במרחב הגיאוגרפי תוך הבחנה בין התנהגות אדם בודד לבין התנהגות קולקטיבית. בחינה זו התייחסה בעיקר לתנועה של בני אדם במרחב-זמן בפעילותם היומיומית (time-geography), ליחסי הגומלין שלהם עם הסביבה העירונית, והערכת דרכים לעיצובה - אך פחות לאופן שבו אנשים נעים במרחב ולתוצר המצרפי של תנועתם. כיום, מתרבים הניסיונות לטפל בדפוס, בהיקף ובהתפלגות תנועת הולכי הרגל תוך התייחסות למאפייני הסביבה העירונית הבנויה.

יאן גאהל (Gehl, 1987) ניתח את השימוש אשר עושים אנשים בשטחים הפתוחים שבסביבה הבנויה. גאהל חקר את האופן שבו ההליכה, העמידה והישיבה מבוצעים במרחב הציבורי ואת הצרכים האנושיים המבקשים מענה בסביבה הבנויה. הוא מדגיש את חשיבות קנה המידה האנושי של הסביבה הבנויה להולכי הרגל, וקושר בין תכנון העיר לשימוש שעושים הולכי הרגל במרחב הציבורי. לדידו של גאהל, כמות הולכי הרגל במרחב הציבורי, ומשך הזמן שהם שוהים בו, מעידים על איכותו. הוא מבחין בשלוש קטגוריות של פעילות במרחב הציבורי. הראשונה היא פעילות הכרחית שמתבצעת בכל תנאי, כגון הליכה לבית-הספר או לתחנת אוטובוס. הקטגוריה השנייה כוללת פעילויות לא הכרחיות כגון טיול או ישיבה שמבוצעות רק בתנאים טובים מבחינת מזג-אוויר ומרחב ציבורי אשר מאפשר אותן. הפעילויות בקטגוריה השלישית הן תוצר של שתי הקטגוריות הראשונות וכוללות פעילות חברתית עם המשתמשים האחרים במרחב. פעילויות אלה יכולות להיווצר כתוצאה של מפגשים אקראיים בין שני אנשים או פעילויות מתוכננות כגון אסיפות עממיות והפגנות.

גאהל מרחיב על השימוש שעושים אנשים במקומות ישיבה במרחב ועל חשיבותם של הפרטים המעוצבים בקנה-מידה אנושי המותאמים למהירות ההליכה של הולכי רגל. המחשה להבחנה זו ביו סוגי הקני"מ התחבורתי מוצגת באיור מס' 2.1.



איור 2.1: קנה מידה של מרחבים ציבוריים - מימין שדרות רוטשילד בתל-אביב קנה מידה אנושי; משמאל שיקוע בצומת שדרות בגין ורח' קפלן בתל-אביב קנה מידה לרכב ממונע

על פי גאהל תפיסת המרחק שלנו מושפעת מאופי המרחב ומידת הגירויים החושיים שהוא מספק, ומהתנאים הסביבתיים שבו כדלקמן (שם, עמ' 139):

"A stretch of 500 meters viewed as a straight, unprotected and dull path is experienced as very long and tiring, while the same length can be experienced as a very short distance if the route is perceived in stages. For example, the street can wind a bit, so the space is closed and the distance to be walked is not immediately visible, provided that the walk takes place under good external conditions.

Acceptable walking distances thus are an interplay between the length of the street and the quality of the route, both with regard to protection and to stimulation en route."

ובהמשך, הולכי רגל שואפים תמיד ללכת בדרך הקצרה ביותר גם אם היא לא הבטוחה ביותר:

"One of the most important demands on a well-functioning pedestrian system is to organize pedestrian movement to follow the shortest distance between the natural destinations within an area."

בהתבסס על מחקרו של גאהל, מחלק גמזו (Gemzoe, 2006) את המרחב העירוני לשלוש רמות של איכות תנאים להולכי רגל. הרמה הבסיסית היא **הגנה**: הגנה מתנועה אחרת במרחב (בעיקר מכלי רכב), הגנה מפשיעה ע"י יצירת מרחבים בטוחים, והגנה מפגעי מזג האוויר. הרמה השנייה היא הרמה בה מסופקים צרכי ה**נוחות** של הולך הרגל במרחב. ברמה זו נדרש לאפשר להולכי הרגל לעמוד בצורה שאינה מפריעה לתנועה, לשבת, לראות את המתרחש בצורה טובה, לנהל שיחה במרחב (כלומר, שרמת הרעש הסביבתי תהיה נמוכה מספיק) והאפשרות לשחק ולהשתתף באופן אקטיבי בפעולות במרחב. ברמת ההיררכיה השלישית מסופקת להולכי הרגל ה**נאה** מהמרחב באמצעות מימדים פיזיים נכונים והרמוניים, אפשרות להנות במיוחד בימים בהם מזג האוויר נעים, ואיכויות אסתטיות טובות. בהתייחס לפן האסתטי, גאהל מרחיב על חשיבותן של חזיתות הבניינים בגובה הרחוב לתנועת הולכי הרגל והתנהגותם במרחב העירוני (Gehl et al, 2006). המחשה לכך מוצגת באיור 2.2.



איור 2.2: סוגי חזיתות - מימין חזית פתוחה המעודדת פעילות ואינטראקציה; משמאל חזית אטומה המייצרת מרחב לא פעיל

אלפונזו מציעה פירמידה בת חמש רמות של צורכי הולכי רגל (Alfonzo, 2005), אשר נלקחים בחשבון על ידי אדם השוקל אם ללכת ברגל ליעד כלשהו. על-פי פירמידת צרכים זו יש לספק את צרכי הרמות הנמוכות לפני שמספקים את צרכי הרמות הגבוהות יותר, וככל שנתיב מסוים ממלא את הדרישות ברמה יותר גבוהה בפירמידה – עולה רמת הסבירות להליכה ברגל. רמת הצרכים הבסיסית ביותר היא היתכנות (feasibility), אשר מתייחסת למגבלות האישיות של הולך הרגל (גיל או נכות למשל). הרמה השנייה היא נגישות (accessibility), אשר בה נכללים היבטים כגון המרחק מהיעד, והמידה בה אפשרי להגיע אליו ברגל או באמצעים אחרים. הרמה השלישית היא בטיחות (safety), אשר מתייחסת לתחושת הבטיחות של הולך הרגל לאורך הנתיב המתוכנן. הרמה הרביעית על-פי אלפונזו היא הנוחות (comfort), אשר בודקת את היחס בין הולכי הרגל לאמצעי התחבורה האחרים והאם יש להולכי הרגל מרחב מספיק לתנועה בבטיחות. ברמה החמישית נמצאת ההנאה (pleasurability) אשר כוללת אספקטים אסתטיים ושימושיים של המרחב הציבורי.

מחקרים רבים מנסים לאפיין את התנאים שמעודדים הליכה ברגל. בין הדוגמאות מהעת האחרונה למאמצי תכנון הקשורים להולכי רגל ניתן למנות את הדו"חות של יאן גאהל לערים שונות (Gehl Architects, 2004, 2007) וכן פרויקטים מקיפים כמו הפרויקט האירופי לצרכים האיכותיים של הולכי הרגל (Methorst, 2007) ופרויקט EU-ECOCITY, העיר האקולוגית האירופית (Schubert and Skala, 2007). גם רשויות מקומיות בארה"ב כדוגמת קיימברידג', מסצ'וסטס (City of Cambridge, 2000) ופורטלנד, אורגון (City of Portland, 1998) נוקטות יוזמה ומכינות תוכניות עירוניות אשר נותנות מענה לצרכי התכנון להולכי הרגל. בעקבות מגמה זו גם מדינת ישראל פרסמה הנחיות תכנון לרחובות בערים המיועדות לשפר את תנאי ההליכה במרחב הציבורי (משרד התחבורה ומשרד הבינוי והשיכון, 2012).

תנועת הניו-אורבניזם (ובעברית "עירוניות מתחדשת"), אשר נוסדה בארה"ב, מתמקדת אף היא בשיפור המרחב העירוני ויצירת שכונות מעורבות שימושים בעלות מגוון צורות מגורים וסביבה נוחה להולכי רגל. במסגרת תנועה זו מבוצעים מחקרים רבים בתחום, ונוסחו עקרונות מנחים לבניית שכונות חדשות ושיקום

שכונות ותיקות לטובת הולכי הרגל (Duany et al, 2000). ניתוח של בנייה על-פי עקרונות הניו-אורבניזם מראה שבנייה כזו יוצרת מקומות אשר דומים יותר בתכונותיהם למקומות שנבנו בעבר עם בלוקים קצרים ורשת רחובות הירארכית טובה יותר להולכי רגל (Veras and Amorim, 2005).

בספרה הביקורתי ופורץ הדרך על תכנון הערים המודרני (גייקובס, 2008) מקדישה גיין גייקובס שלושה פרקים תמימים למדרכות, אלמנט התשתית הבסיסי של הולכי הרגל והמקום היחיד המיועד בלעדית עבורם. גייקובס מרחיבה על כך שמדרכות הן החלל הציבורי אשר מקנה ביטחון להולכי הרגל, ולמעשה מאפשר להם להימצא ברחוב, מאפשר מפגשים ישירים מתוכננים ואקראיים עם בני אדם, וכתוצאה משתי תכונות אלה מהווה מרכיב חשוב בחיברות של ילדים. מעבר לכך גייקובס מציינת ארבעה גורמים הדרושים ליצירת אינטנסיביות ורבגוניות עירונית ולהגברת נוכחותם של אנשים במרחב הציבורי: עירוב שימושים ראשוניים (שימושים שאנשים חייבים להגיע אליהם לצורך חיי היום יום) כגון מגורים, מקומות עבודה ומוסדות, מבנה עירוני המורכב מבלוקים קצרים המאפשר אפשרויות תנועה רבות יותר, בניינים שונים בשנת בנייתם כדי ליצור גיוון במחירי הדירות המשתקף בשונות חברתית של הדיירים וצפיפות מגורים גבוהה.

במחקרו הקלאסי מסוף שנות ה-70 של המאה הקודמת הראה אפליארד כי ככל שכמות ומהירות התנועה הממונעת ברחוב עלתה, ירדו בו רמת ההליכה ברגל, הפעילות האופציונלית והחברתית, וכמות הקשרים החברתיים ברחוב (Appleyard, 1981). עם זאת, בתכנון נכון של רחובות ראשיים, כאשר ישנו איזון בין מרחב הולכי הרגל למרחב התנועה הממונעת ניתן להתגבר על השפעתם השלילית של כלי הרכב על המרחב הציבורי, וליצור רחובות המשלבים בצורה טובה סוגי תנועה שונים (Bosselman et al., 1999).

חוקרים ומדריכים לתכנון מגדירים מרחקים מקסימליים הנחשבים לטובים ורצויים עבור הולכי רגל ליעדים שונים. אמילי טאלן (Talen, 2003) מסתמכת על הגדרות הקונגרס לעירוניות מתחדשת (CNU) ומתייחסת למרחק של עד 800 מטר כנגיש בצורה טובה להולכי רגל לצרכים שכונתיים כגון פארקים, בתי-ספר יסודיים וחנויות שכונתיות. נלסן (Nelessen, 1994) מחלק מרחב זה לשלושה: 230 מ' – הוא המרחק שאדם ממוצע יהיה מוכן ללכת ברגל מחניה ליעד כמו מקום עבודה או חנות, התחום השני הוא מרחק ההליכה הממוצע בחמש דקות (כ – 460 מ') המגדיר את הגודל האופטימלי לשכונה, והתחום השלישי הוא כ – 800 מ' (חצי מייל), שהוא המרחק המקסימלי שאנשים יהיו מוכנים ללכת בתדירות גבוהה ליעדם. במחקר אחר (Krizek and Johnson, 2006) נמצא שחלה עלייה משמעותית בסבירות של תושבים ללכת ברגל ליעדם (באופן ספציפי לחנויות שכונתיות), רק כאשר הן נמצאות במרחק של פחות מ-200 מטר מביתם. כמו כן, במחקר שבוצע בתל-אביב (וייסמן, 2005), נמצא ששיעור ההגעה לפארק שכונתי באמצעות הליכה ברגל גבוה בצורה משמעותית בקרב תושבים המתגוררים במרחק של עד 300 מטר מהפארק לעומת תושבים המתגוררים במרחק גדול יותר. יתר על כן, מחקרים מלמדים שאפשר גם שיהיה שוני בהתפלגות הולכי הרגל באזורים סמוכים, כדוגמת מחקר שבוצע במרכז איסטנבול (Ozer and Kubat, 2007).

מחקרים רבים ניסו לעמוד באופן אמפירי על הקשר בין הצרכים הנתפסים של הולכי הרגל לרמת ההליכות של אזור מסוים (walkability). כך למשל, מחקר שנעשה בעיר לידס שבבריטניה ניסה ליצור אינדקס של שימושי קרקע לבדיקת רמת הליכות (Kelly et al, 2007). המחקר הניח כי ניתן לאפיין את צרכי הולכי הרגל באמצעות ניתוח מסלול מסויים ובחן באמצעות שאלונים את צרכיהם הנתפסים של הולכי הרגל בסיומו של מסלול נבחר. נמצא כי להולכי הרגל חשובים הניקיון, הבטיחות ורציפות ההליכה ברשת

הרחובות. עקב ההכרה באופייה הרב ממדי של תנועת הולכי רגל ובצורך להשתמש במשתנים פיזיים, סביבתיים, חברתיים, ודמוגרפיים (Saelens et al, 2003), מחקרים מסוג זה נשאו אופי אינדוקטיבי וכללו משתנים רבים שנותחו בדרך כלל באמצעות שיטת שונות של ניתוח גורמים (factor analysis). כדוגמה למחקרים אלה ניתן לציין את מחקרו של סרין (Cerin et al, 2006) שבחן על-סמך 1,286 שאלונים, במספר שכונות באזור סיאטל שבארה"ב בעלות מאפיינים שונים מבחינת רמת ההליכות, ומבחינת הרמה הסוציו-אקונומית של תושביהן, את הגורמים הנתפסים ע"י תושבים כמעודדים הליכה למטרות תחבורה. ממצאיו הראו כי מידת עירוב שימושי הקרקע, צפיפות המגורים, התשתית הפיזית להליכה ברגל, סביבה אסתטית, בטיחות מתחבורה וביטחון מפשע עודדו תושבים ללכת ברגל.

מחקר נוסף (Cervero and Radisch, 1996) ביקש לבחון האם עיצוב השכונה משפיע על דפוסי התנועה של תושביה. לשם כך נבדקו שני פרברים של סן פרנסיסקו, דומים מבחינה סוציו-אקונומית, אך אשר אחד מהם בנוי באופן קומפקטי, ובעל מידת עירוב שימושים גדולה יותר, לעומת השני אשר אופיין כצפוף פחות ועם רשת רחובות מקושרת פחות. נמצא כי מבנה הסביבה הבנויה של אזור המגורים משפיע באופן מובהק על הבחירה אם ללכת ברגל או להשתמש ברכב פרטי, ועל יחס השימוש באמצעי תחבורה אלה למסעות (trips) אשר מבצעים התושבים. תושבי השכונה בעלת הבלוקים הקצרים ועירוב שימושי קרקע נעו ברגל באחוזים גבוהים יותר מאשר תושבי השכונה אשר בה הקישוריות נמוכה יותר בין הרחובות והבלוקים ארוכים יותר. מחקר זה אמנם קשר בין העדפת השימוש באמצעי התחבורה למבנה שכונות המגורים, אך תוצאות המחקר עשויות להיות תוצאה, חלקית לפחות, של בחירה עצמית (self selection) של תושבים להתגורר בשכונות אשר תואמות את העדפות התחבורה שלהם. כלומר, תושבים אשר מעדיפים ללכת ברגל עשויים לבחור להתגורר במקומות בהם הליכה ברגל נוחה יותר, ואילו תושבים המעדיפים לנוע ברכב, עשויים לבחור להתגורר במקומות נוחים יותר לתנועה ברכב פרטי. הקשר בין דפוסי התנועה למבנה אזור המגורים עשוי לנבוע בחלקו מהעדפות שונות של התושבים ולא דווקא בגלל תכונות המבנה עצמו.

2.2 תנועת הולכי רגל ילדים וקשישים

על-פי סקר ספרות מקיף בתחום השפעת הסביבה הבנויה על תנועת הולכי רגל (Saelens and Handy, 2008), נעשו מעט מחקרים בהם נבחנו באופן ספציפי תנועת הולכי רגל ילדים או קשישים, מלבד מחקרים רבים יחסית בארץ ובעולם אשר עסקו באופן ממוקד בהליכה של ילדים מביתם לבית-הספר ובחזרה תוך התייחסות לבטיחות בדרכים (ראה למשל: ליפמן, 2008; Johnston, 2008).

אף שתנועת הולכי רגל של ילדים ומבוגרים מושפעת מגורמים דומים לאלה של כלל האוכלוסיה ניתן למצוא דומיננטיות גבוהה יחסית של חלק מהם. בקרב ילדים בולטים גורמים כגון: תפיסת ביטחון ובטיחות המרחב על ידי ההורים, מידת הנוחות והנגישות להתניידות ברכב, אמצעי התנועה הנפוץ של ההורה עצמו. במחקר שנערך במספר שכונות בלונדון (Hillier, 1996, pp. 147-154) נמצא כי ילדים נטו לשהות במרחק של פנייה אחת ממסלולי ההליכה המרכזיים (הרחובות בעלי רמת האינטגרציה הגבוהה ביותר ראו להלן), והעדיפו לשהות ברחובות משניים סמוכים. מחקר אחר אשר בו נבחנו תנועת הולכי רגל מבוגרים, קשישים, בני נוער וילדים באיסטנבול (Ozer and Kubat, 2007) מצא הבדלים בין תנועת מבוגרים לתנועת ילדים. באחד האזורים שנבחנו, אשר בו יש ריכוז מסחר שאינו פעיל במהלך סוף השבוע, נמצא כי באמצע השבוע הלכו בו כמויות גדולות יותר של מבוגרים, ואילו בסוף השבוע הלכו באזור יותר בני נוער. יוצא אפוא, שלילדים ובני נוער אפשר שיהיו דפוסי הליכה ונוכחות שונים מאלו של מבוגרים.

בסקירת ספרות מקיפה העוסקת בבטיחותם של הולכי רגל קשישים (Dunbar et al, 2004) נמצאו מחקרים רבים העוסקים באתגרים הבריאותיים והקוגניטיביים אשר מקשים על הולכי רגל קשישים והופכים אותם לאוכלוסייה פגיעה במיוחד. כמו כן, ניתן מקום רב לאמצעי בטיחות אשר עשויים להפחית את הפגיעה בהולכי רגל קשישים (שיפור המדרכות, הארכת זמן מחזור לחצייה מרומזרת וכיו"ב). תחושת ביטחון נמצאה כגורם חשוב שמושפע ממאפיינים מרחביים אובייקטיביים, כדוגמת תאורת רחוב, הימצאות הולכי רגל נוספים וחזיתות מבנים הפונות כלפי הרחוב. ביטחון ובטיחות נמצאו כגורם הראשי בחיזוי הליכה, הן למטרת התניידות (destination walking) והן לפעילות ספורטיבית (recreation walking). מדדים סובייקטיביים של "חשש מפשיעה", ומדדים סטטיסטיים של פשיעה בפועל, יכולים גם כן לסייע בניבוי תנועת הולכי רגל קשישים, בעיקר בלילה. ניתן לצפות לפחות תנועה במקום ש"מעורר חשש" יותר ממקום שנתון לפשיעה רבה יותר אך לא מעורר את אותה תחושת חוסר ביטחון. המאפיינים השונים של הסביבה העירונית משתלבים יחדיו ליצירת תחושה כללית המעודדת או מונעת הליכה.

2.3 חיזוי תנועת הולכי רגל

ניתן לסווג את הניסיונות להסביר ולחזות תנועה בעיר לשתי גישות. גישה אחת מסתמכת על מטריצות מוצא-יעד הנבנות באמצעות מידע לגבי התפלגות המגורים של האוכלוסיה בעיר מצד אחד, ומרחבי התפקוד שלה כגון תעסוקה וקניות מצד שני (ראה למשל: Batty, 2005). מטריצות אלו משמשות לבניית מודלים של אינטראקציה מרחבית (spatial interaction models) על פי עיקרון הגרביטציה, המניח כי ככל שאנשים יהיו יותר קרובים לפעילות מסוימת (במרחק או בזמן), כך גדל הסיכוי שלהם להעדיף אותה על פעילויות מקבילות רחוקות יותר. סיכום של סך כל התנועות של התושבים והמועסקים במרחב מסוים משמש לחיזוי היקף התחבורה בין חלקי העיר ובין העיר לסביבתה. יתרונה העיקרי של גישה זו הוא בהתבססותה על צרכי התנועה האמיתיים של תושבים בעיר, ובאפשרות לערוך הבחנה בין קבוצות אוכלוסיה שונות, ומוקדי משיכה שונים. חסרונה טמון בצורך באיסוף מידע מפורט על מקום מגורים ותפקודים שונים, ועל העדפות התושבים בין יעדים מקבילים מבחינת תיפקודם. (Borgers and Timmermans, 1986; Batty, 2005). בניית המודל מצריכה להעריך את האטרקטיביות היחסית של תפקודים בעיר ואת פונקציית הדעיכה עם המרחק לכל אחד מהתפקודים. יחד עם זאת, משימה זו מצריכה פחות משאבים כאשר, כמו במחקר הנוכחי, קיימת פעילות רוטינית של אוכלוסיה מוגדרת במרחב מצומצם, כמו לדוגמה הליכה של ילדים לבית הספר, או היחס בין בתי מגורים למרכזי קניות או פארקים שכונתיים. כך לדוגמה במחקרה בעיר פורטלנד, אורגון, מיפתה טאלן (Talen, 2003) את רמת הנגישות של הבלוקים בעיר לשירותים השכונתיים השונים. מטרת המחקר הייתה להעריך באילו בלוקים יש לתושבים נגישות טובה באמצעות הליכה ברגל לצרכים שכונתיים כגון פארקים, בתי-ספר יסודיים וחנויות שכונתיות, וכך להעריך את רמת הנגישות לשירותים שהשכונה מציעה לתושביה. הנחת המחקר היתה שמסלולי הליכה הם פונקציה של היחס בין מקום המגורים לשירותים השכונתיים והם ניתנים לחישוב על סמך רשת הדרכים.

היום בניית מודל אינטראקציה אפשרית יותר מבעבר בזכות התפתחות טכנולוגיית המידע הגיאוגרפי המאפשרת למדוד ולהעריך את היחס בין בתי המגורים לתפקודים שכונתיים ועירוניים, לחשב מסלולי הליכה ואינטראקציה מרחבית באזורים גיאוגרפיים נרחבים וברמת רזולוציה גיאוגרפית גבוהה (Batty, 2003; Talen, 2009). מידע גיאוגרפי מפורט ברמת המבנה על שימושי הקרקע בעיר, רשת הדרכים, ועל התכונות הדמוגרפיות והחברתיות של האוכלוסיה קיים כיום בישראל, בדומה לערים רבות במדינות

המערב (Maguire et al., 2005). על סמך מידע זה, ניתן להעריך מסלולי הליכה בין בית המגורים לתפקודים קרובים ובתוך כך להעריך אינטראקציה בין מקומות ולחשב מפות פוטנציאל (potential maps) לחיזוי תנועה בעיר (Longley and Batty, 1996). מידע כזה מצוי בידי הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה, המרכז למיפוי ישראל ובידי הרשויות המקומיות. יתר על כן, בידי מרבית הרשויות מקומיות קיימות מערכות מידע גיאוגרפי שבהן יש מיפוי תפרוסת המגורים של תלמידים ותפרוסת בתי הספר שבהם הם לומדים. מידע כזה מאפשר להעריך באופן מדויק מסלולי הליכה לבית הספר.

גישה שנייה לחיזוי תנועה במרחב העירוני היא הגישה המבנית (configurational approach), אשר מסתמכת על התכונות הטופולוגיות של רשת הדרכים, בהנחה שתכונות אלו כשלעצמן יש בהן כדי להסביר התנהגות מרחבית של בני אדם בעיר (Hillier et al, 1993). יתרונה של גישה זו מצוי ביכולת לחזות תנועת הולכי רגל או כלי רכב ברחובות העיר על סמך מבנה רשת הרחובות בלבד, מבלי להזדקק לנתונים על מקום המגורים ומרחבי הפעילות של האוכלוסיה, ומבלי לערוך סקרי פעילויות ותנועה של התושבים, שהם בדרך כלל פחות זמינים וכרוכים בהשקעה רבה יותר של משאבים. לגישה זו יתרון נוסף והוא היכולת לחזות תנועת הולכי רגל בקנה מידה גיאוגרפי של אזור מצומצם יחסית.

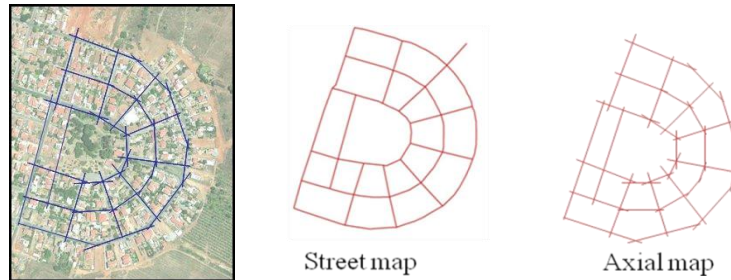
2.4 הגישה המבנית והניתוח הטופולוגי של תחביר המרחב – Space Syntax

אחת הגישות הבולטות בתחום חקר תנועת הולכי הרגל בעיר היא גישת "תחביר המרחב" - Space Syntax. גישה זו קושרת בין המבנה הטופולוגי של רשת הרחובות לתנועת הולכי הרגל בה. ראשית פיתוחה החל בשנות ה-80 עם יציאתו של ספרם של היליאר והנסון (Hillier and Hanson, 1984) שעסק בלוגיקה החברתית שבבסיס המרחב הפיזי. פריצת דרך נוספת נרשמה עם יציאתו של מאמר מקיף הקושר את התנועה הטבעית של הולכי הרגל במרחב למבנה של רשת הרחובות (Hillier et al, 1993). בעוד שתיאוריות אחרות רואות את המרחב העירוני רק כתווך שבו נעשית התנועה ואשר משפיע עליה באמצעות מידת החיכוך והעיכוב שהוא יוצר בין נקודות מוצא ויעד, תיאוריית תחביר המרחב מתמקדת על הקשר בין המבנה הטופולוגי של רשת הרחובות לתנועה. לטענתה מבנה רשת הרחובות העירונית משפיע על התנועה בו, דרך יכולת ההתמצאות שלנו במרחב. בתורה מכתיבה כמות התנועה גם את התפלגות שימושי הקרקע ותופעות אחרות במרחב.

גישה זו מתבססת על ניתוח טופולוגי-ויזואלי של הסביבה הבנויה תוך ניסיון לחזות את ההתנהגות המרחבית, ובכלל זה את תנועת הולכי הרגל וכלי הרכב (Hillier et al, 1993; Turner, 2007; Jiang, 2009). במסגרתה מוצגת גם הפרדיגמה של "תנועה טבעית" ('natural movement'), שלפיה מבנה רשת הרחובות העירונית משפיע לא רק על התנועה אלא גם על דפוסי שימושי הקרקע ותופעות אחרות במרחב (Hillier et al, 1993, p.1). ביטוי לכך ניתן בעמדה המוצגת כאן:

"It is suggested that the configuration of the urban grid itself is the main generator of patterns of movement. Retail land uses are then located to take advantage of the opportunities offered by the passing trade and may well act as multipliers on the basic pattern of 'natural movement' generated by the grid configuration."

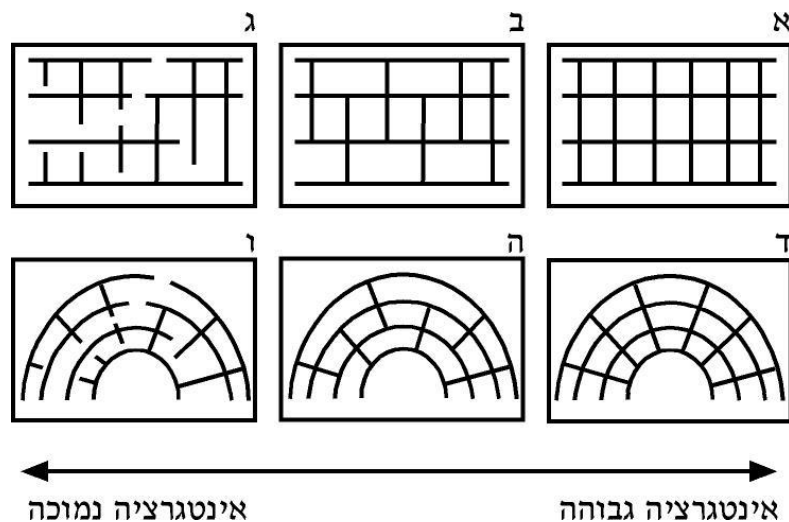
הגישה של תחביר המרחב מתבססת על מדידת מספר תכונות של רשת הרחובות, המבטאות את דרגת הנגישות היחסית של מקומות ברשת הרחובות בעיר. ניתוח תכונות אלה מסתמך על התמרה של מפת הרחובות של שכונה או עיר למפת קווי ציר (axial map) המבטאת את דרגת הנגישות הויזואלית מנקודת מבטו של האדם הנע במרחב. מפה זו נבנית על סמך רשת הרחובות באמצעות קווים ישרים המכונים קווי ציר (axial lines). העיקרון המנחה בנייה כזו הוא כיסוי כל חללי העיר במינימום קווי ציר כמודגם באיור 2.3.



איור 2.3: דוגמא של בניית מפת צירים על סמך רשת הרחובות בסביבה עירונית

כל קו ציר במערכת ניתן לחלוקה למספר מקטעים בהתאם למספר הצמתים החוצים אותו. כל מקטע הוא חלק חסר פניות מקו ציר מסוים, אשר נמצא בין שני צמתים בהם קו הציר נפגש עם קווי ציר אחרים. בניית תחביר המרחב ניתן למנות כמה סוגי מרחקים שונים (Hillier and Iida, 2005) אשר בעזרתם ניתן להגדיר את היחס בין מקטעי הרחובות (street segments) השונים המרכיבים את הרשת העירונית - מרחק מטרי, מרחק טופולוגי ומרחק גיאומטרי (angular distance). סוג המרחק הראשון מתבסס על המרחק המטרי הקצר ביותר בין מרכז מקטע נתון לשאר המקטעים ברשת. המרחק הטופולוגי מתבסס על מפת קווי הציר ונמדד על פי מספר הפניות בין קו ציר המוצא ליעד, כאשר לכל שינוי כיוון, ויהא בזווית הקטנה ביותר, ניתן ערך שווה. המרחק הגיאומטרי מבוסס מפת המקטעים של קווי הציר ונמדד על-פי סכום זוויות הפנייה בין המקטעים במעבר מקטע מוצא לקטע יעד.

כאשר דרגת הנגישות בעיר מסתמכת על רשת הרחובות שלה היא ניתנת לבחינה על פי דגמי רשת הרחובות שנכללות בה ועל צורתה הגיאומטרית (איור 2.4). דגם הרחובות בעיר יכול לנוע מדגם גריד מקושר לגמרי (איור 2.4 א') עד לדגם עץ מקוטע המאופיין ברחובות ללא מוצא רבים ובקווים עקומים (איור 2.4 ו'). ככלל ניתן לומר שככל שהדגם קרוב לדגם גריד ישר זווית יש חיבור טוב בין חלקי העיר ודרגת האינטגרציה והנגישות היחסית של הרחובות היא שוויונית יותר. איור 2.4 גם ממחיש את השוני בין תכונות טופולוגיות לגיאומטריות: הדגמים א-ג עם הקווים הישרים והדגמים ד-ו עם הקווים העקומים זהים מבחינה טופולוגית אבל שונים מבחינה גיאומטרית. כיסוי רשת הדרכים בצירי ראייה מאפשר אפוא להתייחס גם לתכונות הטופולוגיות וגם לתכונות הגיאומטריות של רשת רחובות.



איור 2.4: דגמים של רשת רחובות - הנבדלים בדרגת האינטגרטיביות תוך הבחנה בין קבוצת דגמים של קווים ישרים (א-ג) לקבוצת דגמים של קווים עקומים (ד-ו). הקבוצות זהות מבחינה טופולוגית אך שונות מבחינה גיאומטרית.

ניתוח היחס הטופולוגי בין קווי הציר, מפיך מספר מדדים של רשת הרחובות (Hillier, 1996). הממד הראשון הוא מדד החיבוריות (connectivity) המבטא את מספר קווי הציר המצטלבים ישירות עם הקו הנבדק, וערכיו הם מוחלטים. הממד השני הוא מדד האינטגרציה (integration), הבדק את המרחק הטופולוגי (מספר הפניות שצריך לבצע) בין קו הציר הנבדק עם כלל קווי הציר במפת הצירים הנבדקת. מדד נוסף, הוא מדד הבחירה (choice). מדד זה מבטא את הסבירות שקו ציר מסוים ישמש לצורך מעבר בין כל שני קווי ציר אחרים בעיר בדרך הקצרה ביותר (מבחינת מספר הפניות), דהיינו "עד כמה עוברים דרכו". ערך הממד מחושב על פי מידת הימצאותו של קו ציר מסוים על גבי המסלול הקצר ביותר (טופולוגית) בין קווי ציר אחרים במערכת. ככל שקו ציר מסוים נמצא על גבי יותר מסלולים קצרים ביותר בין קווי ציר אחרים כן גדל ערך הבחירה שלו. מדד האינטגרציה וממד הבחירה הם מדדים שניתנים לחישוב גלובלי (לכל קווי הציר שבמערכת הרחובות), וכן לחישובים מקומיים ברדיוסים שונים של מרחק (כלומר במרחק של עד מספר פניות מסוים מהקו הנבדק). מדד אינטגרציה מקומית ברדיוס 3 למשל ($r=3$) מבטא את קרבתו הטופולוגית של קו ציר מסוים בהתייחס לסביבתו הסמוכה בה נכללים רק קווי הציר המצויים במרחק של עד שלושה צעדים טופולוגיים ממנו. באותו אופן, הן מידת האינטגרציה והן מידת הבחירה ניתנות לחישוב לכל קו ציר ברדיוסים שונים, אשר מבטאים את דירוגו של קו הציר ברמה המקומית שלו במערכת.

מדד נוסף, המכונה 'נהירות' (intelligibility), מתאר את היחס בין ערכי דרגת החיבוריות ודרגת האינטגרציה הגלובלית של כל ציר, ברמת העיר בכללותה. מדידה זו זכתה למונח 'נהירות' או 'מובנות' כיוון שהיא מלמדת עד כמה המבנה הגלובלי של העיר נהיר ומוכן לאדם מנקודת המבט המקומית על המרחב העירוני אותו הוא רואה בכל מקום ומקום. יש לציין כי בעוד שהמדדים של קישוריות ואינטגרציה הם מדדים המותאמים לכל קו ציר במערכת, מדד הנהירות מאבחן את המערכת כולה ועל כן הוא נקרא מדד מסדר שני (Hillier, 2002).

הגישה המבנית יושמה לחיזוי תנועת הולכי רגל במקומות רבים, בעיקר באמצעות שימוש במרחק הטופולוגי המבוסס על מפות קווי ציר. בלונדון נערכו מחקרים אחדים שהוכיחו רמת חיזוי של תנועת הולכי הרגל בטווח של 55-75% (Hillier et al, 1993; Jiang, 2009). באמסטרדם נמצאה רמת חיזוי של בין 60-70% (Read, 1999), ובבוסטון השימוש בטכניקה זו הראה רמת חיזוי של 57-86% (Raford and Ragland, 2006). כאשר שולבה בה התייחסות לתפקודים. רמת החיזוי מבטאת עד כמה התפלגות התכונות המבניות של רשת הדרכים מסבירה את השונות (מקדם הקורלציה R^2) בהתפלגות תנועת הולכי הרגל ברשת זו. הרחבה לגבי מאמרים אלה תבוא בהמשך.

גיאנג (Jiang, 2009, p. 8) ביטא את משקל המבנה הטופולוגי בהסבר תנועה כך:

"As we can see, over 60% of human movement can be predicted or explained purely from a topological point of view. In terms of statistics, the other 40% is not predictable, and it may relate to land use, building height and road width, etc."

בנסיון לערוך השוואה בין סוגי המרחקים (מטרי, טופולוגי וגיאומטרי) בהקשר של ניבוי תנועת הולכי רגל בחנו הילייר ואאידה (Hillier and Iida, 2005) את רמת המתאם בין מדדי בחירה ואינטגרציה המבוססים של שלושת סוגי מרחקים אלו מול מדידת נפח תנועת הולכי רגל ב-356 מקטעים בארבעה אזורים שונים בלונדון. בבחינה זו נמצאו מתאמים גבוהים יותר למרחק גיאומטרי (מתאם ברמה של 0.52-0.72) ולמרחק טופולוגי מתאם ברמה של 0.53-0.70) לעומת מתאמים נמוכים יחסית שנמצאו ביחס למדדים המבוססים על המרחק המטרי (0.31-0.58). ממצאים אלה מבססים את העמדה של תחביר המרחב הגורסת שתכונות גיאומטריות וטופולוגיות הן הרלוונטיות יותר לחיזוי תנועה בעיר.

מעניין לציין שבחינת נתוני תנועת כלי רכב בלונדון (Turner, 2007) העלתה כי למדדים הנוצרים מניתוח מקטעים על-בסיס מרחק גיאומטרי ישנם מתאמים סטטיסטיים טובים יותר מאלו של המדדים המבוססים על מרחק טופולוגי של קווי הציר בכללותם. מעבר לכך, ניתן לבצע ניתוחים גיאומטריים אלה ברדיוסים מטריים (בניגוד לרדיוסים טופולוגיים, המבוססים על מספר פניות, רדיוס מטרי מבוסס על מרחק מטרי), וההתאמה הגבוהה ביותר בניתוח תנועת כלי רכב במרכז לונדון נמצאה בניתוח מקטעים גיאומטרי ברדיוס של 2,000 מטר. בנוסף, ממחקר אחר (Hillier et al, 2007) עולה כי ניתן לאתר ריכוז של תפקודים מושכי תנועה כגון מסחר באמצעות מדדי אינטגרציה ובחירה על בסיס מרחק גיאומטרי שנערך ברדיוסים מטריים שונים. אף שניתן לשער כי עשויה להיות לכך השלכה גם על נפח תנועת הולכי רגל, לא בוצעה עדיין השוואה בין מדדי ניתוח מקטעים המבוססים על רדיוס מטרי לנפחי תנועת הולכי רגל באופן שיטתי.

2.5 גורמים נוספים המשפיעים על תנועת הולכי רגל

על אף חשיבותו של דגם הרחובות, הוא אינו הגורם היחיד המשפיע על דרגת האינטגרציה המרחבית ברשת הרחובות. אינטגרציה זו מבטאת את הקשר בין מקומות ברשת הרחובות והחיבור ביניהם ולכן היא מושפעת גם מפגיעה ברציפות רשת הרחובות (Hillier, 1996; 2002). פגיעה זו תלויה בגודל וצורת המחיצות המרחביות (spatial partition) הקוטעות את רציפות הרשת כדוגמת אזורים לא בנויים בעיר או שטחים פתוחים שלא ניתן לעבור דרכם. בהתאם לעקרון המרכזיות (centrality) ככל שהמחיצות המרחביות גדולות יותר, רחבות יותר וממוקמות במרכז של רשת הרחובות, כך פוחתת דרגת האינטגרציה המרחבית. בנוסף להשפעת המחיצות המרחביות, דרגת האינטגרציה המרחבית מושפעת גם מצורת העיר

בכללותה. ככל שצורת העיר היא קומפקטית יותר כך מתקצרים המרחקים בין חלקיה ולכן היא אינטגרטיבית יותר. וההיפך, ככל שצורת העיר היא ליניארית יותר כך מתארכים המרחקים בין חלקי העיר והאינטגרציה המרחבית פוחתת (Hillier, 1996).

בנוסף להשפעת רשת הדרכים, איכות ועירוב שימושי קרקע וצפיפותם במרחב העירוני נמצאו במחקרים כחיוניים לעידוד הליכה ברגל. בהקשר זה יש מקום להתייחס להתאמת ארכיטקטורת הרחוב לקנה מידה של הולכי רגל כדוגמת גודל בניינים, שילוט ורוחב הרחוב וכן תחושת ביטחון, משתני מזג אוויר, קישוריות של המרחב הפוטנציאלי להליכה, קריאות המרחב ויכולת ההתמצאות בו (שנסקרו לעיל בסעיף 1).

לשימושי הקרקע, ובמיוחד למסחר ברחוב, השפעה מהותית על תנועת הולכי רגל. מחקרים מסויימים עשו ניסיונות ליצור אינדקס של שימושי קרקע לבדיקת רמת הליכות (Kelly et al, 2007), בעוד שבאחרים נמצא על סמך בחינה אמפירית שלמסחר השפעה מהותית מאוד (Chu, 2005, Ozlem and Kubat, 2007). מחקרים נוספים (Desyllas et al, 2003) שבדקו את השפעת שימושי הקרקע על הליכה בעיר, מצאו שהפרמטר המשפיע ביותר מתוך כלל שימושי הקרקע הוא חזיתות מסחריות לרחוב (לעומת מבני ציבור, חנייה, משרדים ושימושים אחרים). בנוגע לבחירת אמצעי תחבורה של תושבים בשכונה עצמה נמצא שמבין האלמנטים של עירוב שימושים – האלמנט החשוב ביותר לעידוד הליכה ברגל ברמת השכונה הוא הימצאותם של אפשרויות מסחר בקרבה למגורים (Cervero and Duncan, 2003).

במחקרים נוספים נעשו ניסיונות לשלב בין שתי קבוצות הגורמים: המרחביים, והתפקודיים. מחקר משולב מסוג זה השווה שתי שכונות במרכז איסטנבול (Ozer and Kubat, 2007) נמצא כי נפח תנועת הולכי הרגל הושפע בעיקר מדרגת הנגישות/האינטגרציה הכללית של הרחוב, ובמידה מסוימת גם מתחושת הביטחון של הולכי הרגל וממידת העירוב של שימושי הקרקע. במודל תנועת הולכי רגל בלונדון (Desyllas et al, 2003) נמצא שלתכונות המרחביות שחושבו על בסיס תחביר המרחב ההשפעה הרבה ביותר על תנועת הולכי רגל, כאשר מבין שלל תכונות תפקודיות שנבחנו, הקירבה לתחנות תחבורה ציבורית, ושיעור חזיתות מסחריות בקומת הרחוב, נמצאו כמשמעותיות ביותר ליצירת מודל משולב בעל מתאם סטטיסטי גבוה ($R^2=0.82$). מודל לתנועת הולכי רגל בבוסטון עשה שימוש בתכונה המרחבית של אינטגרציה גלובלית המבוססת על ניתוח טופולוגי בשילוב משתנים הנוגעים לפריסת שימושי קרקע כגון קרבה לתחנות תחבורה ציבורית וקרבה לאטרקציות תיירותיות (Raford and Ragland, 2006). מחקר שנערך לאחרונה באטלנטה (Ozbil et al., 2011), מחזק אף הוא את הטענה לפיה לרשת הדרכים השפעה דומיננטית על התפלגות תנועת הולכי רגל בעיר, בעיקר בכל הקשור למשקלם היחסי של מקטעי רחובות באזור נתון בעיר שהיקף ההליכה הכללי שבו מושפע ממערך שימושי הקרקע וממיקומו בעיר.

על בסיס סקר הספרות, ולאור התמקדותנו באוכלוסיות הולכי הרגל הילדים והקשישים, נעשה במחקר זה שימוש במספר משתנים מרחביים וכן במספר משתנים תפקודיים המבוססים על שימושי קרקע. מלבד נוכחות של מסחר שנמצא כמשתנה תפקודי מוביל במחקרים רבים, בחרנו לבחון את השפעתם של משתנים המבוססים על שימושי קרקע יעודיים לקשישים (כגון בתי-אבות ומועדונים לקשישים) וילדים (כגון בתי-ספר). הרשימה המלאה של המשתנים בהם נעשה שימוש בניתוח וחיזוי תנועה במחקר זה מוצגת בטבלה 4.1.

עם זאת, לא מצאנו מחקרים העוסקים בחיזוי התפלגות תנועת הולכי הרגל של אוכלוסיית הילדים והקשישים ובאפיונה אל מול תנועת האוכלוסייה הכללית. חיזוי תנועת הולכי רגל ילדים וקשישים באופן ייחודי, מהווה אם כן את אחד מאתגרינו וחיידושינו של המחקר הנוכחי.

2.6 קטגוריזציה של דגם הרחובות

מתוך הדיון למעלה מתקבלת תמונה לפיה דגם הרחובות משפיע בצורה דומיננטית על תנועת הולכי הרגל. באופן כללי ניתן לחלק את דגמי הרחובות לקדם-מודרני מצד אחד ולמודרני מצד שני על-פי מידת החיבוריות שלהם והירארכיית הדרכים שהם מייצגים. מרשל מציע ארבע קטגוריות לדגם הרחובות, אשר מייצגות באופן כללי את רשתות הרחובות השונות (Marshall, 2005, pp. 85-86). הקטגוריה הראשונה כוללת רשתות צפופות ומתייחסת בעיקר למרכזים של ערים היסטוריות או ישובים שצמחו באופן היסטורי. הקטגוריה השנייה מייצגת רשתות בעלות רציפות וקישוריות גבוהה, כדוגמת רשתות אורתוגונליות מהסוג שרווח בפיתוח עירוני במאה ה-19 ותחילת המאה ה-20 עד בוא המודרניזם. שתי הקטגוריות האחרונות מייצגות רשתות מקוטעות שהתבססו בתקופה המודרנית תחת הגדרות של הירארכיית דרכים שלפיהן תוכננו מרבית השכונות והרבעים העירוניים בחצי השני של המאה ה-20.

מחקר שבוצע על בסיס קטגוריזציה זו (Marshall and Garrick, 2010) ב-24 ערים בינוניות בקליפורניה מצא כי הערים בעלות דגמי הרחובות הקדם-מודרניים היו בטוחות יותר מבחינה תחבורתית. ערים אלה אופיינו ברחובות בעלי קישוריות גבוהה וצפיפות גדולה יותר של צמתים. שיעור התאונות הקטלניות בהן היה נמוך מזה שבערים בעלות דגמי הרחובות המודרניים. מחקר נוסף אשר בחן שתי שכונות סמוכות בתל-אביב אשר אופיינו בדגמי רחובות שונים – דגם רחובות קדם-מודרני באחת ודגם רחובות מודרני בשנייה – מצא פערים של למעלה מ-50 אחוזים בשיעור תנועת הולכי הרגל לטובת השכונה שדגם רחובותיה היה קדם-מודרני (Lerman and Omer, 2013).

2.7 החשיבות של חיזוי כמות הולכי הרגל לבטיחות בדרכים

במסגרת המתודולוגיה של תחביר המרחב נערכו מחקרים אחדים בניסיון לרתום את היכולת להעריך את נפח התנועה של הולכי הרגל, למטרת איתור מוקדי סיכון עבורם לתאונות דרכים. כך לדוגמא, מחקר שבוצע בעיר אוקלנד בקליפורניה מצא שרוב המוחלט של הצמתים המסוכנים יותר להולכי רגל היה דווקא בשוליים המזרחיים של העיר, ולא במרכז העיר היכן ששיעור התאונות המוחלט היה גבוה יותר. שיעור הסיכון בצמתים המסוכנים היה גבוה פי 3.5 משיעור הסיכון בצמתי מרכז העיר (Raford, 2003). מחקר מסוג זה מאפשר למקבלי ההחלטות לשים לב למקומות בהם נחוצה השקעה בשיפורי תשתיות על סמך רמת הסיכון שהם מייצגים להולכי הרגל.

ילדים וקשישים מהווים קבוצות בסיכון גבוה לתאונות דרכים בין כלי רכב להולך רגל. נמצא קשר הדוק בין התנהגות ההורים למידת ואופי ההליכה הרגלית בקרב ילדים. הגורמים העיקריים המשפיעים על ההליכה הרגלית בעיר בקרב ילדים הם: תפיסת ביטחון ובטיחות של המרחב על ידי ההורים, מידת הנוחות והנגישות לניידות ברכב, ואמצעי התחבורה הנפוץ של ההורה עצמו (McMillan, 2005; Garrad, 2009). בנים בגילאי 5-9 הינם קבוצת הסיכון הגדולה ביותר לתאונות דרכים, כיוון שהם טרם פיתחו שליטה עצמית (Barton et al, 2011). ילדים בגיל בית ספר יסודי, מעורבים בתאונות דרכים בעיקר באמצע הרחוב בין צמתים, כתוצאה מהתפרצות הילד לכביש. תאונות אלו מתרחשות לרוב בסמיכות לבית, לא פעם ברחובות משניים ובעיקר בחודשי הקיץ (Ha and Thill, 2011). במקרה של בני נוער, בעיקר בשכונות ממעמד סוציו-אקונומי נמוך בהן אין לילדים מסגרת לפעילות פנאי מחוץ לשעות בית הספר, נפוץ שימוש חברתי ברחוב, שנתפס כמרחב חופשי ללא פיקוח הורים תוך הפרדה מעולם הילדים. בני הנוער מעבירים את זמנם בקבוצות בעלות מאפיינים טריטוריאליים ודפוס התנועה שלהם גדול מרחבית בעיקר בשעות הערב והלילה (Matthews et al, 2000).

קשישים (מגיל 65 ומעלה) מעורבים בתאונות דרכים בעיקר בצמתים ובמהלך חצייה באור ירוק. תאונות אלו מיוחסות לרוב לאשמת הנהג. בשונה משכונות מגורים, בהן נפוצות תאונות המערבות ילדים, באזורי תעשייה ובילוי נמצא אחוז גבוה של תאונות דרכים המערבות אנשים בוגרים (לאו דווקא קשישים) החוצים בצמתים (Ha and Thill, 2011).

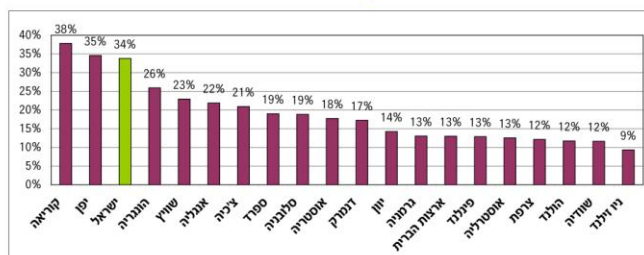
בנוסף לניסיונות לאתר את גורמי ההשפעה על בטיחות וסיכון לתאונות, מחקרים אחרים מראים (ראה למשל: Jacobsen, 2003; Geyer et al, 2006) שבאזורים בהם ישנם יותר הולכי רגל הסיכון היחסי לתאונות דרכים עם הולכי רגל קטן, לעומת אזורים שבהם ישנם פחות הולכי רגל ואשר בהם הסיכון היחסי להולכי הרגל להיפגע בתאונות דרכים גבוה יותר. כלומר, הסיכון להולכי הרגל קטן ככל שנוכחותם ברחוב גדלה. חשוב לציין כאן, שהערכת סיכון יחסי בהתאם לידע אמפירי זה אינה אפשרית אם לא קיים מידע על כמות הולכי רגל הצפויים להיות במקומות בהם התרחשה התאונה. האפשרות לחיזוי כמות הולכי רגל על-סמך משתנים בסביבה הבנויה מאפשרת לנקוט בצעדים שיעודדו שימוש בהליכה ברגל, יגבירו את נפח הולכי הרגל וכפועל יוצא יצמצמו את הסיכון היחסי להולכי הרגל.

בטרם נעסוק בפרטי המחקר עצמו ראוי גם לבחון את שיעורי תאונות הדרכים בהם מעורבים הולכי רגל בישראל, וכן את שיעור הנפגעים בקרב קבוצות הילדים והקשישים. איור 2.5 מציג מספר השוואות בינלאומיות בנושא זה, הגרפים המתייחסים לילדים ולקשישים מתייחסים לכלל ההיפגעות בתאונות דרכים, ולא לתאונות שבהן מעורבים הולכי רגל בלבד. מתוך איור זה ניתן לראות ששיעור הולכי הרגל בישראל מכלל ההרוגים בתאונות דרכים עומד על 34 אחוזים. בהשוואה למדינות המפותחות מדובר בשיעור גבוה ביותר. כמו כן, שיעור ההרוגים של קבוצת הילדים עד גיל 14 מתוך כלל ההרוגים בתאונות דרכים (כולל תאונות דרכים ללא הולכי רגל) הוא הגבוה ביותר מכל המדינות המפותחות ועומד על 11 אחוזים. שיעור זה נובע גם מהאחוז הגבוה יחסית של ילדים בישראל בהשוואה למדינות המפותחות, אך מהווה תמריץ להתמודדות עם סוגיית הבטיחות של הולכי הרגל הילדים.

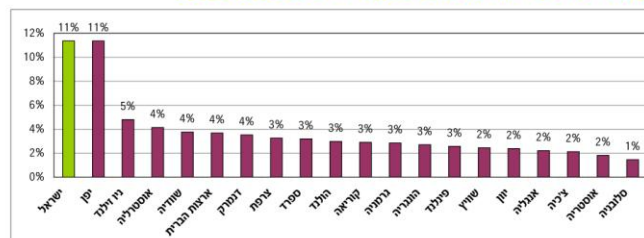
חיזוי כמות תנועת הולכי רגל של ילדים וקשישים ברמת הרחוב מהווה אמצעי חיוני לזיהוי מקומות מסוכנים לאוכלוסיה זו. הצלבת מידע על תנועת הולכי רגל שיתקבל מהמודל עם מידע קיים על נפחי תנועת כלי רכב ברמת הרחוב ותנאי הבטיחות בו כדוגמת: מעברי חציה, רמזורים, מדרכות ושילוט, תסייע בזיהוי של מקומות מסוכנים במיוחד לילדים ולקשישים. מידע כזה יאפשר לנקוט באמצעי בטיחות המתחשבים במגבלות פיזיות וקוגניטיביות של אוכלוסיות אלה.

השוואה בינלאומית

שיעור הולכי רגל הרוגים מתוך סה"כ ההרוגים בת.ד בשנת 2010

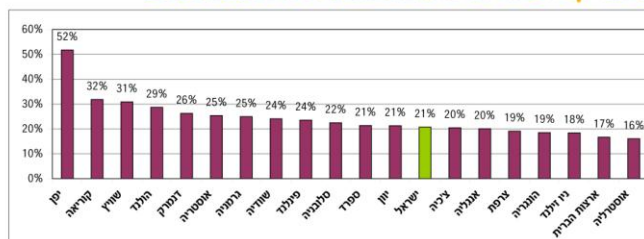


שיעור ילדים* הרוגים בתאונות דרכים בשנת 2010



* ילדים עד גיל 14

שיעור קשישים* הרוגים בתאונות דרכים בשנת 2010



* מבוגרים מעל גיל 65
מקור הנתונים: IRTAD

איור 2.5: השוואה בינלאומית של שיעור הרוגים בקבוצות אוכלוסייה שונות (מתוך: הרשות הלאומית לבטיחות בדרכים, 2012, עמ' 22)

2.8 סיכום

בפרק זה נסקרו מחקרים רבים העוסקים בתנועת הולכי רגל באופן כללי וכן בתנועת הולכי רגל ילדים וקשישים בפרט. בנוסף, הוצגו מחקרים העוסקים בחיזוי תנועת הולכי רגל במרחבים עירוניים, והמתודולוגיות בהן נעשו מחקרים אלו. מקום נרחב ניתן לסקירת תחביר המרחב ולאופן בו ניתן לעשות שימוש במתודה זו לטובת ניתוח וחיזוי תנועת הולכי רגל. בפרק הבא העוסק במתודולוגיה יפורט השימוש שנעשה במתודה זו ובגורמים הנוספים המבוססים על שימושי הקרקע שבעזרתם נבנה מודל התנועה בערים ובשכונות השונות אותם חקרנו. כפי שכבר נאמר, לא נמצאו מחקרים העוסקים בחיזוי התפלגות תנועת הולכי הרגל של אוכלוסיית הילדים והקשישים באופן ספציפי ובתחום זה המחקר הנוכחי הינו חדשני.

3. מתודולוגיה

3.1. כללי

שאלת המחקר, בהתבסס על סקר הספרות, היא האם ניתן ליצור מודל כללי לחיזוי תנועת הולכי רגל בערים בישראל, עם התייחסות מיוחדת לילדים וקשישים. על בסיס הידע המדעי הקיים אודות התפלגות תנועת הולכי רגל במרחב העירוני אותו הצגנו בפרק הקודם, ישנן שתי קבוצות עיקריות של תכונות הסביבה הבנויה שלהן השפעה על התפלגות תנועה זו: תכונות מרחביות שמייצגות את המרכזיות הטופולוגית, המטרית והגיאומטרית של צירים ומקטעים ברשת הרחובות בעיר ותכונות תפקודיות של שימושי הקרקע כדוגמת מבני מסחר וחינוך באותם מקטעים הרחובות. בנוסף לכך ניתנת התייחסות לגודל, הרכב וצפיפות אוכלוסיה.

בהתאם לכך, המחקר התבצע בשכונות מגורים נבחרות אשר מייצגות טיפוס שכונות שונים בישראל מבחינת היחס בין מערך התפקודים לבתי המגורים ומבחינת דגם הרחובות ומבנה רשת הדרכים. בכל אחת מהשכונות הנבחרות נאספו נתונים על הולכי רגל באמצעות ספירות תנועה מדגמיות תוך הבחנה בין קבוצות גיל, שעות ביום, דרגת מרכזיות הרחוב ומיקומו בשכונה ובעיר.

3.2. שיטות וכלי מחקר

3.2.1. בחירת הערים והשכונות

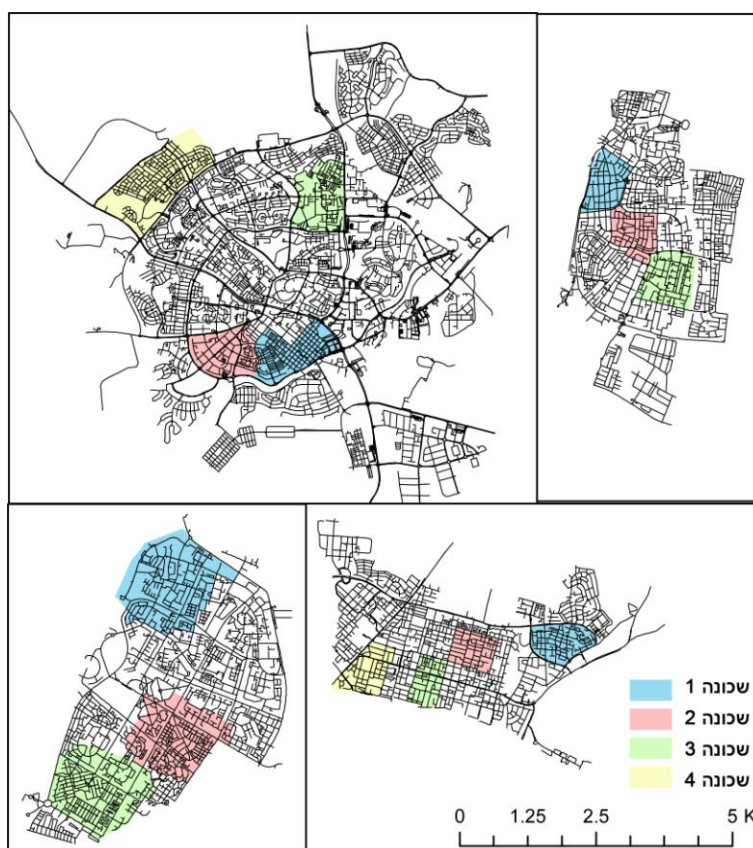
ראשית, שאפנו במחקר זה להתמקד בערים החולקות סדר גודל והרכב אוכלוסייה דומים. לכן נבחרו ערים יהודיות (שאינן חרדיות ואינן מעורבות) בינוניות בין 100 ל-200 אלף תושבים, בין ביקשנו למצוא ערים השונות במבנה המרחבי ובתפרוסת שימושי הקרקע שלהן. הערים שנבחרו מתחלקות לשתי קבוצות. בראשונה, ערים שנוסדו בעשורים הקודמים להקמת המדינה, בהן כפר-סבא ובת-ים שהוקמו בשנות ה-20 וה-30. ערים אלו מתאפיינות במרכז עירוני קדם-מודרני מבחינת רשת הדרכים שלו, ושכונות לווייניות בתכנון מודרני סביבו. מנגד, בקבוצה השנייה, ערים שנוסדו לאחר קום המדינה, כגון אשדוד ובאר שבע (למעט "העיר העתיקה" בה), המאופיינות בתכנון מודרני מוטה תחבורה ממונעת. עם זאת, בכל קבוצה נבחרו ערים שונות בסגנון. בעוד שכפר סבא מאופיינת ברשת רחובות אורתוגונלית בת-ים מאופיינת בסגנון "עיר גנים". אשדוד נבדלת מבאר שבע בתכנון מראש לחלוקה לרבעים המופרדים ביניהם על ידי דרכים עורקיות, ואילו בבאר שבע תוכננו השכונות להיות נפרדות זה מזה, והרחובות העורקיים נוספו מאוחר יותר.

מדגם השכונות כולל שכונות בעלות גיל חציוני גבוה או נמוך מהממוצע כדי לייצג שכונות שבהן לקשישים או לילדים משקל גבוה באוכלוסייה, ועל ידי כך להיות מסוגלים לכייל מודלים מיטביים לתנועתם. הגודל הממוצע של שכונת מגורים/מרחב עירוני שונה מעיר לעיר, בעיקר על פי זמן בנייתה של השכונה. לבחירת השכונות סייע מידע שפורסם לאחרונה על התפלגות דרגת המרכזיות המבנית ברשת הרחובות של ערים בישראל (Omer and Zafir-Reuven, 2010).

המחקר לבניית המודל בוצע ב-14 שכונות בסך הכל: בכפר-סבא ובבאר-שבע ארבע שכונות בכל אחת מהערים; ובאשדוד ובת-ים שלוש שכונות בכל אחת (טבלה 3.1 ואיור 3.1). ערים אלו שונות בדגם הרחובות והתפלגות שימושי הקרקע בהן. הבדלים אלו מאפשרים להבחין בשתי קבוצות של שכונות שנבדלות בדגם הרחובות שלהן ובמערך המרחבי של שימושי קרקע אך דומות במיקומן ביחס למרכז העיר. בקבוצה האחת שכונות מרכזיות הקרובות או משמשות כמרכז העיר ובשנייה שכונות קצה המרוחקות ממרכז העיר.

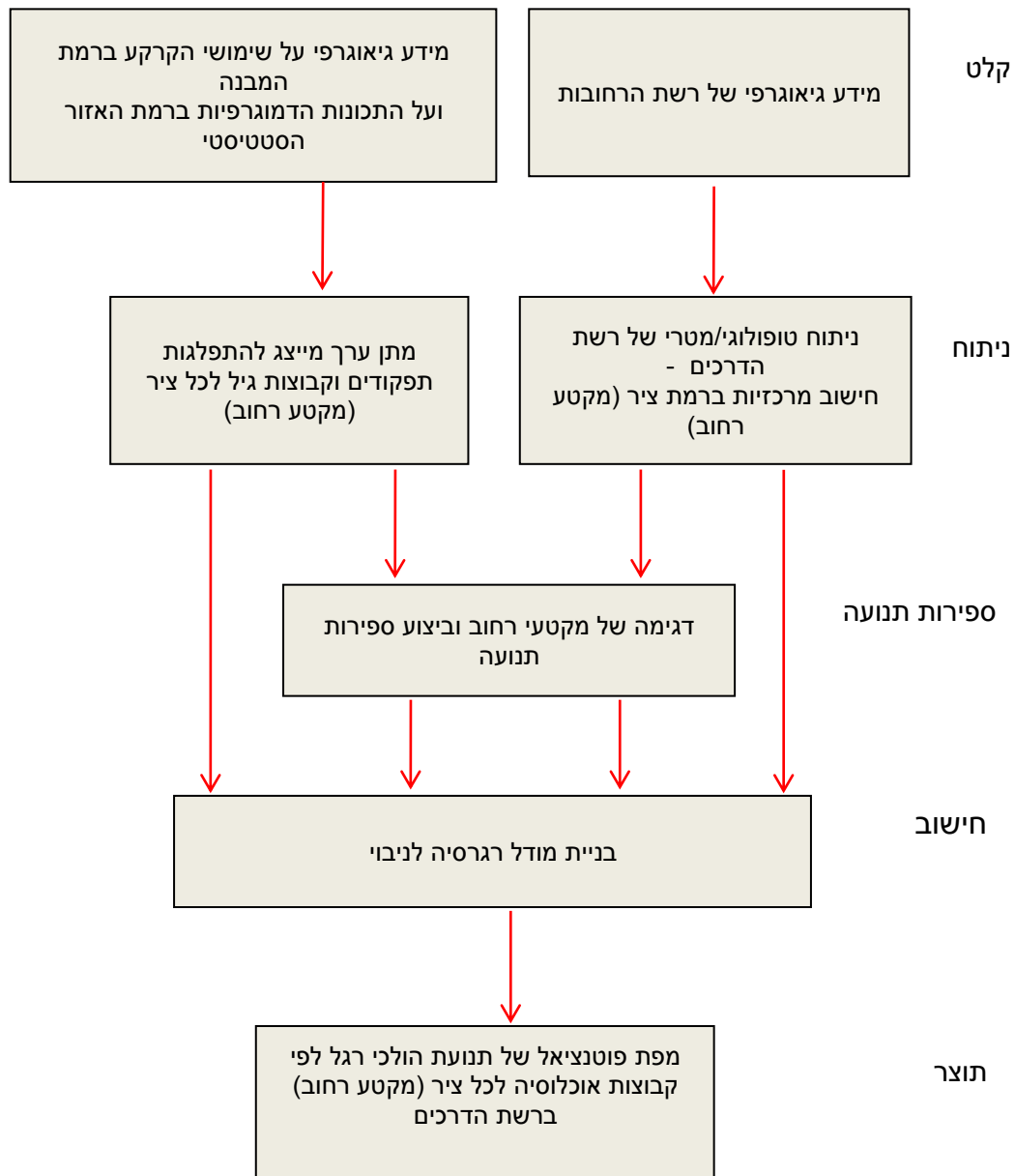
טבלה 3.1 – שמות שכונות המגורים הנכללות במחקר, מספרן (במפות ובטבלאות שיוצגו בהמשך) והעיר בהן ממוקמות

עיר	שם השכונה	מספר השכונה	מיקום בעיר
באר שבע	העיר העתיקה	1	מרכז
	נווה זאב	2	מרכז
	שכונה ד'	3	קצה
	נווה מנחם	4	קצה
בת ים	צפון שדרות העצמאות	1	מרכז
	שיכון ותיקים	2	מרכז
	רמת הנשיא	3	קצה
	גבעת אשכול	1	קצה
כפר סבא	כיסופים	2	מרכז
	דרום רחוב ויצמן	3	מרכז
	דגניה	4	קצה
	רובע א'	1	מרכז
אשדוד	רובע י'	2	קצה
	רובע ט"ו	3	קצה



איור 3.1: הערים והשכונות הנבחרות; משמאל למעלה ובכיוון השעון: באר שבע, בת ים, כפר סבא ואשדוד

בכל אחת מהערים נאספו מידע גיאוגרפי על רשת הדרכים, שימושי קרקע ברמת המבנה ומידע דמוגרפי ברמת האזור הסטטיסטי (ראה סעיף 3.3.1). מידע זה שימש לבניית המודל ברמת העיר וברמת שכונת המגורים. שלבי העבודה מתוארים בתרשים המוצג באיור 3.2.



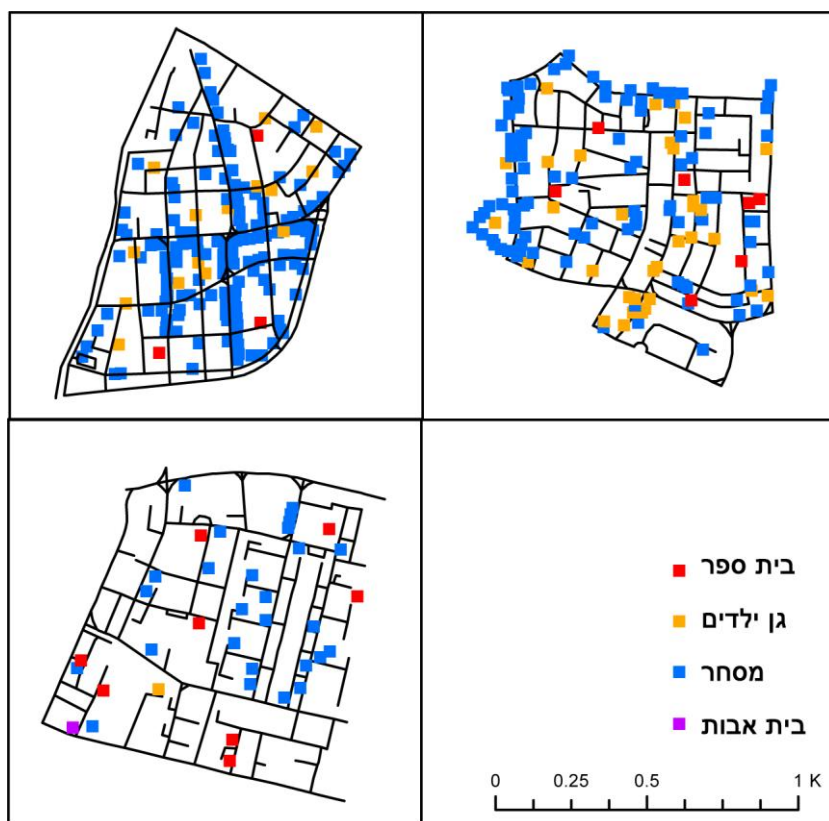
איור 3.2: תיאור בניית מודל לחיזוי נפח תנועת הולכי רגל

3.3. איסוף מידע גיאוגרפי

3.3.1. מידע גיאוגרפי וסטטיסטי

בכל אחת מהשכונות שנבחרו נאספו הנתונים הבאים:

- א. מידע גיאוגרפי על רשת הרחובות (קואורדינטות מדויקות של מיקום הרחוב; מקור: מחלקת ממ"ג (מערכת מידע גיאוגרפי) בעיריות וחברת "מפה"). ביצירת מערכת הרחובות בעיר נוספו גם שבילי הולכי רגל אשר מופו בשטח ובתצלומי אוויר שחסרו במפות הקיימות. בנוסף, כבישים מהירים האסורים לתנועת הולכי רגל הוסרו (כדוגמת נתיבי איילון).
 - ב. מידע גיאוגרפי על שימושי הקרקע בכל רחוב ובמיוחד אלו הרלוונטיים לילדים וקשישים: בתי ספר, מרכזי קניות שכונתיים, בתי אבות, ועוד. לכל מקטע ומקטע חושבו כמות שימושי הקרקע הרלוונטיים במרחק של עד כ-250 מטר. ניתוח זה נעשה בעזרת תוכנת ממ"ג (ArcMap ver. 9.3). שבה הוצלבו המרחק השטוח (flat buffer) של כל שימוש קרקע ברמת מבנה וכל מקטע ומקטע. לאחר מכן, בכל מקטע סוכמו כמה מבנים מכל שימוש קרקע נמצאים במרחק זה.
 - ג. מידע דמוגרפי – גודל והרכב אוכלוסייה וצפיפות מגורים (מקור: הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה, מפקד 2008). בכל התייחסות לממד הדמוגרפי נבחנה אוכלוסיית ילדים (עד גיל 14), קשישים (+65) ושאר האוכלוסייה (15-64). את צפיפות המגורים חישבנו בכל אזור סטטיסטי לכל קבוצת גיל. קרי, כמות האוכלוסייה לפי גילאים בשטח הכולל של כל אזור סטטיסטי שבשכונות הנבחרות.
- איור 3.3 מציג את פריסת שימושי הקרקע בשכונות השונות בבבת ים (התפלגות שימושי הקרקע בשאר ערי המחקר מוצגת בנספחים 1-4). ניתן לראות הבדל משמעותי בפריסת המסחר בין השכונות השונות, כאשר באופן מובהק בשכונות הותיקות יותר המסחר מהווה חלק מרכזי מתמהיל שימושי הקרקע. כך למשל, בשכונת מרכז בת-ים (שכונה 1), בשכונת מרכז כפר-סבא הותיקה ובעיר העתיקה של באר-שבע המסחר נמצא בריכוז גבוה לאורך הרחובות המרכזיים.

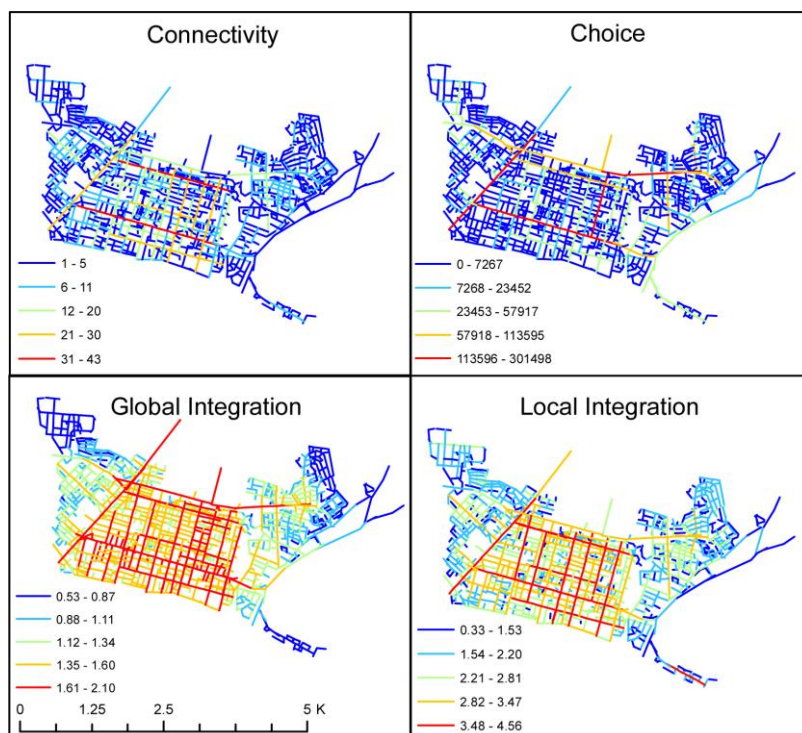


איור 3.3: התפלגות שימושי הקרקע בעיר בת ים משמאל למעלה ובכיוון השעון: שכונה 1-3

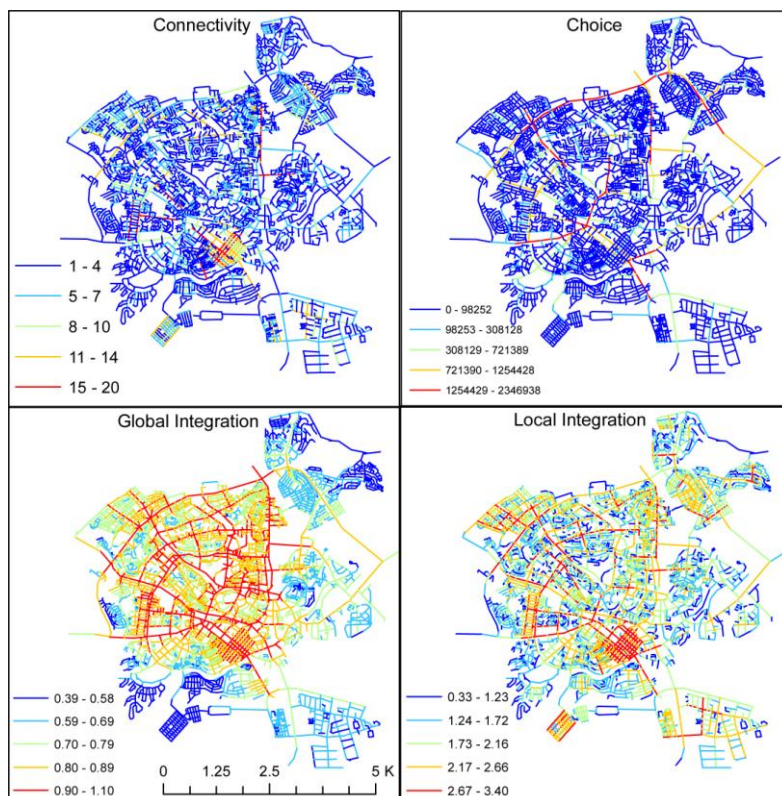
3.3.2. ניתוח המידע הגיאוגרפי על רשת הרחובות

התכונות המרכזיות חושבו לכל רחוב על סמך מדידת דרגת מרכזיות ברשת הרחובות שנערכה באמצעות ניתוח תחביר המרחב (Space Syntax). לצורך זה לכל שכונת מגורים/מרחב עירוני שנבחר נבנתה בשלב ראשון מפת קווי ציר כמתואר לעיל (axial map) על בסיס רשת הרחובות. על סמך צירים אלה נערך חישוב של מדדי 'קישוריות', 'בחירה' ו-'אינטגרציה' גלובליים ולוקליים כמתואר לעיל. בניית מפת קווי ציר וחישוב המדדים נעשו באמצעות תוכנת Depthmap (UCL, v.10.15). חישוב ערכי המדדים מופו באמצעות תוכנת ממי"ג (ArcMap ver. 10.0).

המפות, באיורים 3.4 וב-3.5 (ובנספח 5), מציגות את ארבעת המדדים המרכזיים בכל עיר ועיר. ניתן להבחין מיד בשוני בין ערים ושכונות המאופיינות בדגמי רחובות שונים. לדגם הרחובות השלכות ישירות על דרגות המרכזיות הטופולוגית ועל התפלגות הגיאוגרפית. כפי שניתן להבחין בערים כדוגמת כפר סבא שהדגם בה נוטה להיות דגם שתי וערב מתפלגת דרגת המרכזיות בצורה רציפה, בעיר כדוגמת אשדוד שבה רשת הרחובות היררכית, עם סגירות גבוהה של שכונות, יש הבדל ניכר בין הרחובות הראשיים המאספים שמחברים בין השכונות לבין הרחובות המשניים בתוך השכונות.



איור 3.4: מפות מקטעים (Ssegment map) מבוססות קווי ציר (axial lines) עם תכונות נבחרות של תחביר המרחב: משמאל-למעלה ובכיוון השעון: קישוריות, בחירה, אינטגרציה מקומית, אינטגרציה גלובלית בעיר כפר סבא



איור 3.5: מפות מקטעים (Ssegment map) מבוססות קווי ציר (axial lines) עם תכונות נבחרות של תחביר המרחב: משמאל-למעלה ובכיוון השעון: קישוריות, בחירה, אינטגרציה מקומית, אינטגרציה גלובלית בעיר באר שבע

3.3.3. ספירת תנועת הולכי רגל

מידע על נפח תנועת הולכי רגל ברחובות שכונת המגורים על סמך ספירות תנועה. מדגם ספירות התנועה בשכונה בוצע במגוון רחובות ראשיים ומשניים בעלי ערכי פוטנציאל תנועה שונים שנערכו על פי דרגות אינטגרציה מרחבית שונות, והתפלגות שימושי קרקע שונה באופן שאיפשר כיול מיטבי של המודל. על פי ניסיון קודם (ראה למשל: Raford and Ragland, 2006; לרמן, 2009) הערכנו שיידרשו בין 20 ל-40 מקטעי רחובות לספירת תנועה בשכונת מגורים/מרחב עירוניים בגודל של 0.64 קמ"ר, וזאת בהתאם לצפיפות הצמתים ובעקבותיהם קטעי הרחובות בכל שכונה. שעות המדידה של תנועת הולכי הרגל, כוללות את שעות הבוקר ואת שעות אחר הצהריים המאוחרות. המדידה נעשית בשיטת ה"שערים". המודד עומד בנקודה ברחוב וסופר את כל מי שעובר קו דמיוני החוצה את הרחוב במקום שבו הוא עומד (במקטעי רחובות רחבים או עמוסים מאוד יש למדוד בדרך כלל כל מדרכה בנפרד). משך המדידה בכל מקטע רחוב הוא 10 דקות, כך שכל מודד מכסה 4-5 נקודות מדידה סמוכות בשעה.

בכל אחת מהערים התבצעה ספירת תנועה במקביל. את המדידות ביצע צוות של מודדים שספרו ידנית במשך חמש שעות במקטעים הנבחרים. כל מודד קיבל דף הנחיות, מפה שבה סומנו המקטעים שעליו לספור וטבלה למילוי כל אחד מחמשת סבבי הליכה בין המקטעים (כשעה). בכל מדידה נספרו כלל הולכי רגל, דהיינו בעלי מוגבלויות המתניידים בעזרת מכשירים, עוללים בעגלות וזקנים. הולכי הרגל חולקו לשלוש קטגוריות:

- ילדים עד גיל 14 (כולל)
- כלל האוכלוסייה, נוער מגיל 15 ובגירים עד 64
- קשישים מגיל 65 ומעלה

עם זאת, לא נספרו רוכבי אופניים (אלא אם כן הם הולכים ברגל עם האופניים), גם לא כלבים וחיות מחמד אחרות ובנוסף לא נספרו הולכי רגל בתוך מתחם בתי קפה ברחוב וכד'. בחלק מהמקטעים נספרו בו-זמנית שתי גדות הרחוב במשך 10 דקות. לעומת זאת, במקטעים רחבים דיים כאשר ניתן להבחין בין שתי הגדות או בשדרות נחלקו המקטעים לשניים או שלושה וכל גדה נמדדה במשך 5 דקות. כמו כן, בשדרות, בדומה לרחובות הרחבים, המדידה בכל נקודה נמשכה 5 דקות כולל מרכז השדרה (3 נקודות מדידה בכל מקטע).

נקודות המדידה סומנו במרחק מה מהצומת ולא בצומת עצמה כדי לספור את חציית המקטעים ולא את תנועת הצמתים. בסיום המדידה בנקודה ספציפית ממשיכה המדידה לנקודה הבאה וכך הלאה עד שמסתים הסבב העובר בכל נקודות המדידה. משך סבב שכזה כשעה, כנזכר לעיל 10 דקות לכל אחד מהמקטעים בסבב. הסבב הבא מתחיל תמיד בשעה עגולה ולא עם סיום הסבב הקודם, שאורך קצת פחות משעה. מדידה שלמה מורכבת מחמישה סבבים כאלו. נדגיש, שכל סבב נערך באותו סדר הנקודות, כך שכל נקודה נמדדה באותו חלק של השעה. בנוסף התבקשו המודדים להוסיף מידע רלוונטי לכל מקטע, כגון:

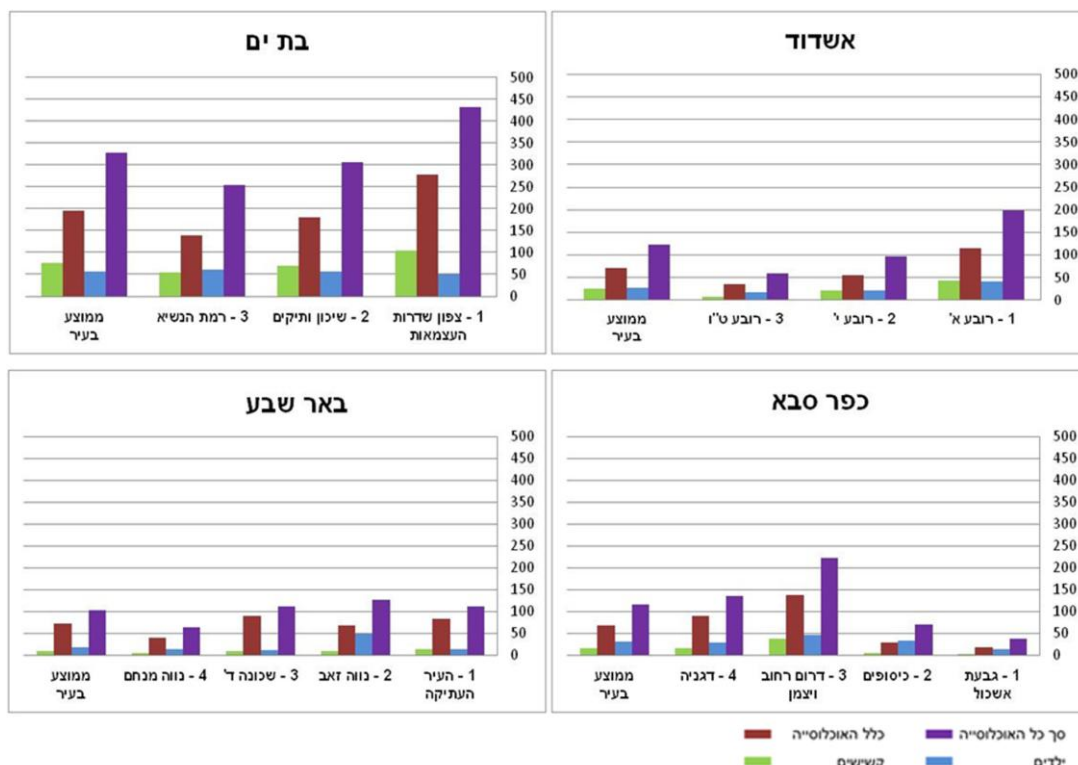
- מבנים או מתקנים הסמוכים לנקודות המדידה בעלי קשר להולכי הרגל, כגון: מבני חינוך או קשישים, מסחר, תחנות אוטובוס וכו'.
- תנאי המקטע: תנאי מזג האוויר וחשיפתו (גשם, שמש ורוחות), מצב רעוע של תשתיות הרחוב או עבודות בנייה החוסמות את מעבר הולכי הרגל.
- בעת מעבר קבוצה גדולה של הולכי רגל; מה מאפיין אותה? – תלמידים, באי בית כנסת, תיירים וכו'.
- וכל הערה מיוחדת אחרת בנקודה מחקר – הצקות, הפרעות, תחושות וכו'.

4. תוצאות

בפרק זה יוצגו תוצאות ספירות התנועה, ולאחריהן הממצאים מחקירה אינטנסיבית של הגורמים המשפיעים על התפלגות תנועת הולכי רגל ב- 14 שכונות מגורים שבהן נערכה הספירה. חקירה זו הובילה לבניית מודלים גנריים לחיזוי נפח תנועת הולכי רגל בשלושה טיפוסים שכונות מגורים שזוהו, תוך התייחסות לתכונות הסביבה העירונית ולהרכב הדמוגרפי של הולכי הרגל. לאחר מכן תוצג הערכת רמת החיזוי והתקפות של מודלים אלה על בסיס יישומם ב- 4 שכונות מגורים נוספות המייצגות שניים מתוך שלושת טיפוסים השכונות.

4.1 התפלגות תנועת הולכי רגל

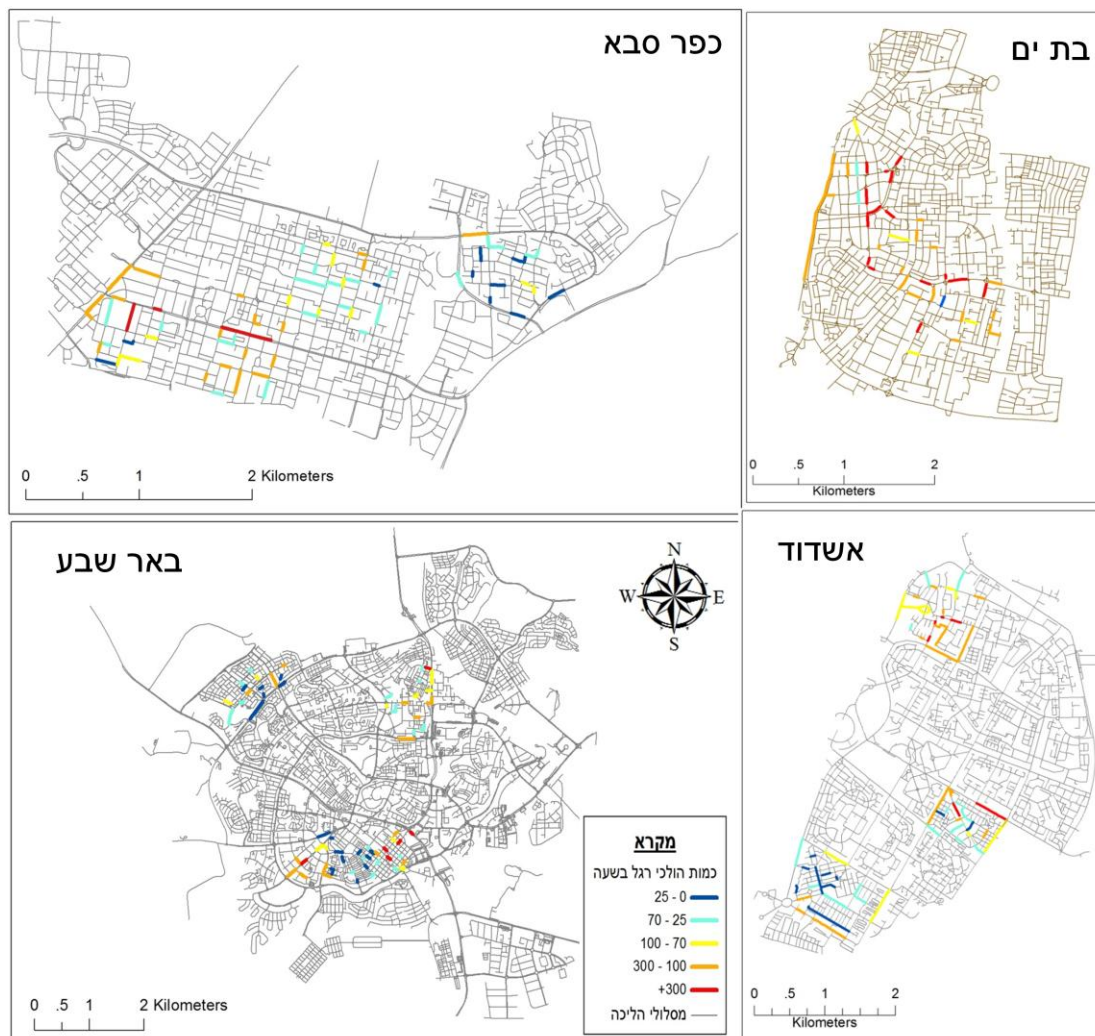
תוצאות ספירות תנועת הולכי הרגל מוצגות באיור 4.1 תוך חלוקה בין הערים, השכונות וקבוצות האוכלוסיה שנבחנו. מהשוואת הנפח הכללי של כלל תנועת הולכי הרגל ניתן להבחין בהבדל ניכר בין הערים. בולטת מבחינה זו העיר בת ים עם ממוצע של כ-430 הולכי רגל במקטע רחוב בשעה, ובמיוחד בהשוואה לבאר שבע בה עומד הממוצע על כ-110 הולכי רגל בשעה (כרבע). בערים כפר סבא ואשדוד נע הממוצע סביב כ-200 הולכי רגל בשעה למקטע רחוב. הבדל זה ניתן לייחס לצפיפות המגורים, לדרגת הקישוריות של רשת הדרכים ולהתפלגות שימושי הקרקע, ועל כך נעמוד בהמשך כאשר נתרכז ברמת שכונת המגורים. נפחי תנועת הולכי הרגל של ילדים ושל קשישים מהווים יחדיו כ-40% מכלל נפח תנועת הולכי הרגל בשכונות המגורים שנבדקו בעוד משקלם בכלל האוכלוסיה עומד על כ-35%. דהיינו, משקלם מכלל תנועת הולכי הרגל גדול מחלקם באוכלוסיה. ואולם, חלקם של ילדים וקשישים בכלל תנועת הולכי הרגל אינו דומה בכל הערים; בכפר סבא ובאר שבע משקלם של הילדים גדול יחסית, ואילו בבת-ים גדול יחסית חלקם של הקשישים. באשדוד חלקם של ילדים וקשישים בסך כל התנועה שווה פחות או יותר.



איור 4.1: התפלגות נפח תנועת הולכי רגל על פי ערים, שכונות מגורים וקבוצות אוכלוסיה

הערים נבדלות גם בהתפלגות תנועת הולכי הרגל בין השכונות שבמסגרתן. גם מבחינה זו בולטת באר שבע בהתפלגות שוויונית יחסית בין השכונות בהשוואה לערים אחרות, ובמיוחד בהשוואה לכפר סבא בה קיימת השונות הרבה ביותר בין השכונות. הבדל זה ניתן לייחס בעיקר לחוזקו התפקודי של מרכז העיר בכפר סבא.

לעומת זאת בבאר שבע, ובמידה מסוימת באשדוד, תנועת הולכי הרגל נוטה להתפלג בצורה שוויונית יותר, וזאת ככל הנראה כתוצאה מגישת התכנון לפיה הוקמו השכונות החדשות בערים אלה. להבדלים אלה גם השפעה על התפלגות תנועת הולכי רגל בתוך שכונות המגורים (איור 4.2). בחלקן, כמו למשל בבת ים ובשכונות המרכזיות של כפר סבא, ההתפלגות נוטה להיות רציפה עם דמיון בין מקטעי רחובות סמוכים בהשוואה לערים החדשות.



איור 4.2: התפלגות תנועת הולכי רגל בערים. משמאל למעלה ובכיוון השעון: כפר סבא, בת ים, אשדוד ובאר שבע

התפלגות תנועת הולכי רגל ילדים וקשישים עשויה לגלות דפוס שונה בהשוואה לכלל האוכלוסייה. (המחשה לכך ניתן לקבל בעזרת המקרה של אשדוד המוצג בנספח 3). ככלל נוטה התפלגותם של ילדים וקשישים להיות מרוכזת במקומות מסוימים ברחבי העיר וזאת בהשוואה להתפלגות גיאוגרפית שוויונית יחסית של כלל האוכלוסייה. בתוך כך, קיים גם הבדל בין אוכלוסיית הילדים והקשישים וזאת כאשר ילדים מגלים נוכחות רבה יותר במקומות פריפריים בעוד שלקשישים ישנו דפוס דומה יותר לדפוס התנועה של כלל האוכלוסייה הבוגרת עם נטייה לנוכחות מוגברת ברחובות המרכזיים, ובסמוך למסחר. כל אלה מרמזים על השפעה דיפרנציאלית של האוכלוסיות הנבחות.

4.2 שלב החקירה ובניית מודל להערכה וחיזוי של נפח תנועת הולכי רגל

בניית המודל להערכה וחיזוי של נפח תנועת הולכי רגל נעשתה בשאיפה להשגת שתי מטרות. האחת, חיזוי של נפח התנועה על סמך מידע גיאוגרפי על רשת הדרכים, התפלגות שימושי הקרקע בעיר וצפיפות

האוכלוסיה. השניה, בניית מודל גנרי שיהיה ניתן ליישמו במרחבים עירוניים מגוונים, ובכלל זה בקנה מידה של העיר בכללותה, תוך שאיפה ליישום המודל במקומות נוספים ללא צורך בספירת הולכי רגל, או לכל הפחות להביאה למינימום הכרחי.

בכל מודל גרסיה רבת משתנים שנבנה ושיוצג להלן, המשתנים התלויים הם נפחי תנועת הולכי הרגל הממוצעת במקטע רחוב (סגמנט) במשך שעה. המשתנים הבלתי תלויים נחלקים לשלוש קטגוריות: (א) משתנים המייצגים את התכונות המרחביות של מקטע רחוב ברשת הדרכים על פי שיטת הניתוח של תחביר המרחב, כדוגמת דרגת קישוריות, אינטגרציה מקומית וגלובלית; (ב) משתנים המייצגים את שימושי הקרקע הממוקמים במקטע, ו-ג) משתנים דמוגרפיים (טבלה 4.1).

טבלה 4.1 : תיאור המשתנים הבלתי תלויים והתלויים (נפח תנועת הולכי רגל) שנותחו במהלך בניית מודל הרגרסיה וסיווגם לקבוצות.

שם משתנה	תאור	סוג
סוג רשת הרחובות (StreetGrid)	מידת הקישוריות של רשת הרחובות (0-2)	מרחבי
קישוריות (AxCon)	מספר קווי הציר המצטלבים עם המקטע	מרחבי-טופולוגי
אינטגרציה גלובלית (Integ)	אינטגרציה גלובלית של קו הציר	מרחבי-טופולוגי
אינטגרציה מקומית (IntegR3)	אינטגרציה המקומית ($r=3$) של קו הציר	מרחבי-טופולוגי
אינטנסיביות גלובלית (Intensit)	אינטנסיביות גלובלית של קו הציר	מרחבי-טופולוגי
אינטנסיביות מקומית (IntenR3)	מידת אינטנסיביות מקומית ($r=3$) של קו הציר	מרחבי-טופולוגי
עומק ממוצע גלובלי (AxMD)	מידת העומק הממוצע הגלובלי של קו הציר	מרחבי-טופולוגי
עומק ממוצע מקומי (AxMDR3)	מידת העומק הממוצע המקומי ($r=3$) של קו הציר	מרחבי-טופולוגי
בחירה גלובלית (Choice)	מידת הבחירה הגלובלית של קו הציר	מרחבי-טופולוגי
בחירה מקומית (ChoiceR3)	מידת הבחירה המקומית של קו הציר ($r=3$)	מרחבי-טופולוגי
עומק ממוצע גיאומטרי גלובלי (MD)	מידת העומק הממוצע הגיאומטרי של המקטע על גבי קו הציר	מרחבי-גיאומטרי
עומק ממוצע גיאומטרי מקומי (MDR##)	כ"ל מוגבל בחישוב מקומי על בסיס מרחק מטרי	מרחבי-גיאומטרי
עומק ממוצע מטרי גלובלי (MMD)	מידת העומק הממוצע המטרי של המקטע	מרחבי-מטרי
עומק ממוצע מטרי ברדיוס (MMDR##)	כ"ל מוגבל בחישוב מקומי על בסיס מרחק מטרי	מרחבי-מטרי
מסחר (SegComFront)	סך חזיתות מסחריות במקטע רחוב (0-2)	תפקודי
שימושי קרקע של קשישים (SegEldFront)	סך חזיתות עם שימושי קשישים במקטע רחוב (0-2)	תפקודי
בתי-ספר (SegSchFront)	סך חזיתות של בתי-ספר במקטע רחוב (0-2)	תפקודי
צפיפות מגורים (TOT_DEN_S)	צפיפות מגורים באזור הסטטיסטי שבו נמצא המקטע	דמוגרפי
גודל אוכלוסיה (TOT_AB_PO_S)	סך תושבים באזור הסטטיסטי שבו נמצא המקטע	דמוגרפי
תנועת הולכי רגל (SegTotal)	ממוצע סך תנועת הולכי רגל בשעה	משתנה תלוי
תנועת הולכי רגל ילדים (SegKid)	ממוצע סך תנועת הולכי רגל ילדים (0-14) בשעה	משתנה תלוי
תנועת הולכי רגל מבוגרים (SegGen)	ממוצע סך תנועת הולכי רגל מבוגרים (15-64) בשעה	משתנה תלוי
תנועת הולכי רגל קשישים (SegEld)	ממוצע סך תנועת הולכי רגל קשישים (+65) בשעה	משתנה תלוי

בשלב הראשון של ניתוח הנתונים נערכו רגרסיות לינאריות רבות משתנים לבחינת ההשפעה של מכלול המשתנים המסבירים את התפלגות תנועת הולכי רגל של כלל האוכלוסיה, של קשישים בלבד ושל ילדים בלבד (המשתנים התלויים), וזאת ללא התחשבות בעיר בה ממוקמת שכונת המגורים, בגבולותיה של השכונה, או במיקומה הגיאוגרפי בעיר. תוצאות הניתוח (טבלה 4.2), מלמדות שלכל אחת מקבוצות המשתנים הבלתי תלויים השפעה על תנועת הולכי הרגל, כאשר הדומיננטיות שלהן משתנה בהתאם לקבוצת האוכלוסיה הנבחנת. משקלם של המשתנים המסבירים תנועת הולכי רגל ילדים וקשישים נוטה

להיות שונה מתנועת הולכי הרגל מבוגרים. קשישים, ובמידה רבה יותר ילדים, מושפעים יותר ממשקלם של משתני המרכזיות של מקטעי הרחובות בטווחים קצרים (רדיוס 250-750 מ') וממשקלם של המשתנים הדמוגרפיים. ילדים גם פחות מושפעים מנוכחות של מסחר שמהווה משתנה דומיננטי בהסבר התפלגות תנועת הולכי הרגל של קשישים וכלל האוכלוסיה. בחינת מקדמי הקורלציה של קבוצות האוכלוסיה הנבחנות מצביעה על כך שהיכולת לחזות את תנועת הולכי רגל עשויה להיות גבוהה לגבי כלל האוכלוסיה ($R^2 = 0.59$) אך חלשה יותר כאשר מתרכזים באוכלוסיית הקשישים ($R^2 = 0.53$) וחלשה במיוחד כאשר מדובר על ילדים ($R^2 = 0.32$).

טבלה 4.2: תיאור המשתנים הבלתי תלויים הדומיננטיים בהסבר נפח תנועת הולכי רגל על פי חלוקה לקבוצות אוכלוסיה

קבוצת אוכלוסיה	משתנים עיקריים מסבירים על פי סדר דומיננטיות	מקדם קורלציה (R^2)
כלל האוכלוסיה	מסחר; צפיפות מגורים וגודל אוכלוסיה באזור (הסטטיסטי); המשתנים המרחביים: דרגת בחירה גלובלית, אינטגרציה לוקאלית, אינטגרציה גלובלית	0.59
קשישים	צפיפות קשישים באזור (הסטטיסטי); מסחר המשתנים המרחביים עומק ממוצע גיאומטרי לוקלי; עומק ממוצע מטרי ברדיוס 250 מ' ודרגת בחירה גלובלית.	0.53
ילדים	המשתנה המרחבי: דרגת בחירה לוקלית; צפיפות אוכלוסיה בכלל באזור (הסטטיסטי); מסחר; המשתנים המרחביים: עומק ממוצע גיאומטרי לוקלי ברדיוס 750 מ' ועומק ממוצע לוקלי של ציר	0.32
מספר הרחובות (N=229). מקדם הקורלציה (R^2) חושב על סמך המשתנים בעלי רמת מובהקות ($p < 0.05$). סדר המשתנים על פי מידת הדומיננטיות שלהם.		

בשלב השני נערכו הרגרסיות לכל אחת מהערים בנפרד. ההשערה היא שימצאו קווים משותפים בין שכונות מגורים שהתפתחו באותה עיר בכל מה שקשור להשפעת הקונטקסט העירוני, המורפולוגי והתפקודי. תוצאות הניתוח מוצגות בטבלה 4.3 תוך הבחנה בין המשתנים המייצגים תכונות של מרכזיות ואינטגרציה לבין משתנים תפקודיים של שימושי הקרקע. ניתוח תנועת הולכי רגל ברמת העיר מלמד על שוני בין הערים על פי תקופת הקמתן. בערים הוותיקות (בת ים וכפר סבא), שרוב הרשת העירונית שלהן תוכננה בגישת תכנון קדם מודרנית, התפלגות התנועה מושפעת יותר מדרגת המרכזיות של מקטע רחוב ברשת הרחובות של העיר כולה. לעומת זאת, בערים שהוקמו לאחר קום המדינה (אשדוד ובאר שבע), אשר תוכננו בגישת תכנון מודרנית, התוצאות מושפעות יותר מדרגת המרכזיות המקומית של מקטע הרחוב. ניתן לראות שלמעט בבאר שבע, אפשר להגיע לרמת חיזוי גבוהה של כלל תנועת הולכי רגל ברמה של מעל ל-60%.

טבלה 4.3 : המתאם (מקדם קורלציה R^2) של דרגת מרכזיות ברשת הרחובות והתפלגות שימושי קרקע עם תנועת כלל הולכי רגל ברמת העיר

עיר	משתנים עיקריים מסבירים על פי סדר דומיננטיות		
	מרכזיות/אינטגרציה מרחבית	שימוש קרקע	אינטגרציה מרחבית + שימושי קרקע
אשדוד	עומק ממוצע מטרי ברדיוס 1000 מ', עומק ממוצע גיאומטרי ברדיוס של 750 מ'	צפיפות מגורים; מסחר	עומק ממוצע מטרי ברדיוס 1000 מ', צפיפות אוכלוסיה באזור סטטיסטי, ומסחר
R^2	0.62	0.56	0.78
בת ים	אינטגרציה גלובלית, עומק ממוצע מטרי ברדיוס 1500 מ'.	מסחר	מסחר; משתנים מרחביים: בחירה גלובלית, עומק ממוצע מטרי ברדיוס 1500 מ'.
R^2	0.48	0.45	0.64
כפר סבא	עומק ממוצע גיאומטרי- טופולוגי ברדיוס 4000 מ', עומק ממוצע מטרי ברדיוס 1500 מ'.	צפיפות מגורים; מסחר	משתנים מרחביים: עומק ממוצע גיאומטרי- טופולוגי ברדיוס 3000-4000 מ'; צפיפות אוכלוסיה באזור סטטיסטי, מסחר
R^2	0.54	0.46	0.63
באר שבע	עומק ממוצע גיאומטרי-טופולוגי ברדיוס 750-1000 מ'	מסחר, בתי ספר	מסחר; משתנה מרחבי: עומק ממוצע מטרי ברדיוס 1000 מ'; בתי ספר
R^2	0.19	0.31	0.40

מקדם הקורלציה (R^2) חושב על סמך המשתנים בעלי רמת מובהקות ($p < 0.05$). סדר המשתנים על פי מידת הדומיננטיות שלהם.

אחת השאלות המעניינות העומדות ביסוד מחקר זה נוגעת לתרומה היחסית של קבוצת המשתנים המרחביים המייצגים ערכי המרכזיות ברשת הרחובות ושל קבוצת המשתנים התפקודיים המייצגים את שימושי הקרקע. כדי לתת מענה לשאלה זו, חושבו רגרסיות לינאריות רבות משתנים במסגרת שלושה ניתוחים סטטיסטיים נפרדים: האחד כלל רק את המשתנים הבלתי תלויים המרחביים, השני כלל רק את המשתנים הבלתי תלויים התפקודיים, והשלישי כלל את כל המשתנים הבלתי תלויים. כל אחד מהניתוחים נערך לגבי כל אחת מהאוכלוסיות הנבחות – כלל האוכלוסיה, קשישים וילדים.

השוואת התוצאות (טבלה 4.4) מלמדת שככלל, המשתנים המרחביים נוטים להיות דומיננטיים בהשוואה למשתני שימושי קרקע, וזאת לגבי כל האוכלוסיות הנבחות. יחד עם זאת, ניתן לראות שבערים אשדוד, בת ים וכפר סבא הפער בין השפעת המשתנים המרחביים להשפעת המשתנים התפקודיים גדול יותר בקרב קבוצות הילדים והקשישים. דהיינו, דומיננטיות המשתנים המרחביים ניכרת יותר בהשפעתה על אוכלוסיית הילדים והקשישים, ומשום כך רבה יותר חיוניותם לצורך חיזוי תנועת הולכי הרגל של אוכלוסיות אלו. גם בניתוח זה יוצאת באר שבע מהכלל – הן ברמת החיזוי הנמוכה בכלל והן בדומיננטיות היחסית של משתני שימושי הקרקע בהשוואה למשתנים המרחביים.

טבלה 4 4: המתאם (מקדם קורלציה R^2) בין מרכזיות ברשת הרחובות והתפלגות שימושי קרקע עם תנועת הולכי רגל – השוואה בין ערים וקבוצות אוכלוסיה

עיר	אוכלוסיה	מרכזיות/אינטגרציה	שימושי קרקע	אינטגרציה מרחבית +
אשדוד	כלל האוכלוסיה	0.62	0.56	0.78
	קשישים	0.61	0.49	0.67
	ילדים	0.54	0.31	0.61
	כלל האוכלוסיה	0.48	0.45	0.64
בת ים	קשישים	0.54	0.40	0.61
	ילדים	0.61	0.31	0.61
	כלל האוכלוסיה	0.54	0.46	0.63
	קשישים	0.51	0.37	0.62
כפר סבא	ילדים	0.32	0.22	0.32
	כלל האוכלוסיה	0.19	0.31	0.40
	קשישים	0.07	0.17	0.23
	ילדים	0.17	-	0.18
באר שבע				

מקדם הקורלציה (R^2) חושב על סמך המשתנים בעלי רמת מובהקות ($p < 0.05$). סדר המשתנים על פי מידת הדומיננטיות שלהם. סימן - מציין שאין משתנה מסביר ברמת מובהקות מספקת ($p < 0.05$).

הממצאים העולים מהשוואת המשתנים הנכללים בכל אחד מהגרסיות שנבנו לערים השונות, ובהתחשב בדומיננטיות שלהם בהסבר התפלגות נפח תנועת הולכי רגל, מלמדים שמודל גנרי לניבוי תנועה זו ברמת העיר אינו אפשרי. התוצאות המוצגות בטבלאות 4.3-4.4 מלמדות על שונות רבה במשתנים העיקרים המסבירים את נפח תנועת הולכי רגל בכל עיר. אף שקיימת מגמה לפיה הערים נחלקות על פי רדיוס המרחק שבו התכונות המרחביות נמצאות כמשפיעות, הן נבדלות בדומיננטיות של התכונות, בסוג המרחק לפיו הן נמדדות (מטרי או טופולוגי-גיאומטרי) ובמשקלן היחסי בהשוואה לתכונות שימושי הקרקע והתכונות הדמוגרפיות.

המודלים שנעשו ברמת השכונה מלמדים על שיפור יכולת החיזוי של המודל במרבית השכונות, אך יחד עם זאת, בדיקה משווה בין המודלים של השכונות השונות בכל אחת מהערים מלמדת על שונות משמעותית ביניהם. דהיינו, שכונות הממוקמות בתוך אותה עיר מתנהגות אחרת מבחינת תנועת הולכי רגל. בעיה נוספת, שמחריפה במיוחד בבואנו לבא תנועת הולכי רגל ילדים וקשישים, היא מיעוט התצפיות, שלה השלכות ישירות על רמת המובהקות של המשתנים המסבירים. אלה הן בעיות מהותיות שמקשות על עצם האפשרות לבנות מודל חיזוי לשכונה מבוסס על נתונים ספציפיים, ועל בניית מודל גנרי שיהיה מכוון למגוון שכונות מגורים בארץ, ומבלי שיהיה תלוי בקונטקסט גיאוגרפי ספציפי.

4.3 איתור קטגוריות לטיפוסי שכונות מגורים

השלב הבא בחקירה היה ניסיון לערוך השוואה בין השכונות במטרה לאתר הבדלים וקווי דמיון ביניהן בהקשר לשלוש האוכלוסיות הנחקרות. בחינה ויזואלית וסטטיסטית אינטנסיבית של התפלגות נפח התנועה של הולכי רגל ב- 14 השכונות ושל מידת התאמתה של התפלגות זו להתפלגותם המרחבית של

שימושי קרקע (הרלוונטיים בכל אחת מהאוכלוסיות) ולהתפלגותם המרחבית של דרגות המרכזיות הטופולוגית והמטרית, הובילה לזיהוי של שלוש קטגוריות של טיפוסים שכונות:

- שכונה מסוג A - כוללת את השכונות הממוקמות במרכז ערים, אשר תוכננו בגישת תכנון קדם-מודרנית.
- שכונה מסוג B - כוללת את השכונות הפריפריאליות בערים הקדם-מודרניות אך עדיין בתכנון קדם מודרני.
- שכונה מסוג C - כוללת את השכונות שהוקמו בגישת תכנון מודרנית. גישת תכנון זו מהווה שילוב של שני רעיונות: יחידת השכונות וההירארכיה הפונקציונלית של מערכת הרחובות (Rofé and Omer, 2012).

להוציא את העיר העתיקה בבאר שבע, השכונות בקטגוריה A ממוקמות כולן בערים הוותיקות בת-ים וכפר-סבא. כך גם השכונות בקטגוריה B. לעומתן שכונות קטגוריה C, כוללות שכונות הממוקמות בערים חדשות וגם שכונות שהוקמו לאחר קום המדינה, והממוקמות בשולי הערים הוותיקות בת ים וכפר סבא (וגם בהוד השרון שנבחנה בשלב התיקוף שיפורט בהמשך).

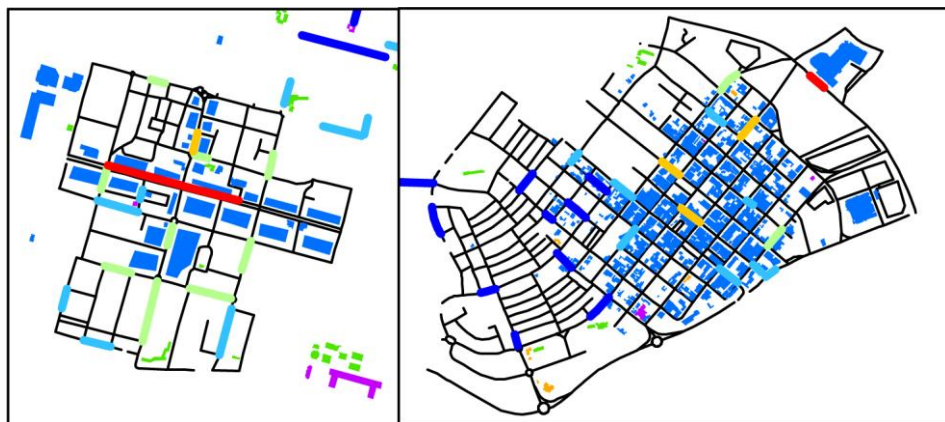
כאן המקום לציין שבמהלך חקירה זו התחלנו עם קטגוריה נוספת (D) שייצגה את מרכזי הערים החדשות. אולם בחינה של הנתונים לימדה אותנו שאין הבדל מובהק בין שכונות הממוקמות במרכזן של הערים החדשות לבין השכונות הממוקמות בשולי ערים אלה. לכן סווגו כל השכונות החדשות לאותה קטגוריה (C), שהמשותף לה היא גישת התכנון המודרנית על פיה הן הוקמו. ניתן לייחס את העדר ההשפעה למיקומן הגיאוגרפי של שכונות בערים חדשות לאופיין התפקודי והמורפולוגי של שכונות אלה, שכולן תוכננו על פי רעיון 'יחידת השכונות'. כתוצאה מכך, שכונות הממוקמות במרכזן של ערים חדשות אינן ניכרות במרכזיות תפקודית לעיר כולה (ערים אלה הן נטולות מרכז למעשה). התפלגות נפח תנועת הולכי הרגל בין השכונות בכל אחד מטיפוסי שכונות אלה משקפת את העדר השוני ביניהן.

איורים 4.3 – 4.5 מציגים שכונות מגורים נבחרות המייצגות את כל אחת מהקטגוריות (ראה נספח 4-1 למפות כל השכונות על פי סיווגן). עיון במפות אלה מלמד שההבדל בין טיפוסי השכונות ניכר בעיקר במבנה המורפולוגי והתפקודי שלהן. דגם רשת הדרכים של השכונות המסווגות בקטגוריה C (איור 4.5 - שכונות חדשות) בנוי בצורה של "עץ" (Alexander, 1964). לעומת זאת השכונות הוותיקות המרכיבות את הקטגוריות A-B (איורים 4.3 ו-4.4), בנויות בצורה של "רשת". דגם "עץ" הוא בעל מבנה הירארכי מובהק ומוגדר שלפיו דרכים קשורות רק לדרכים שהן בדרגה אחת מעל או מתחת לדרגתם ברשת הרחובות. באופן זה, המעבר מדרך שעורקיותה נמוכה ביותר לדרך שעורקיותה גבוהה ביותר נעשית רק באמצעות דרכים שדרגת עורקיותן נמצאת ביניהן. ניתן לראות זאת בבירור בשכונה 'י' באשדוד (איור 4.5). בדגם של "רשת" לעומת זאת, המאפיין דגם רחובות קדם-מודרני, דרכים עם דרגת מרכזיות נמוכה ביותר עשויות להתחבר ישירות לדרכים עם דרגת עורקיות גבוהה, ואף הגבוהה ביותר. דגם זה קיים גם כאשר שכונה ממוקמת הרחק ממרכז העיר לא סמוך לדרך ראשית כדוגמת שכונת כיסופים בכפר סבא (קטגוריה B) וגם כאשר השכונה נמצאת בסמוך לדרך מרכזית כדוגמת שכונת דרום-רחוב ויצמן בכפר סבא (קטגוריה A). מבחינה מורפולוגית ההבדל בין הקטגוריות A ו-B ניכר בעיקר בצפיפות הצמתים ורמת הקישוריות ברשת הדרכים בקטגוריה A, כמו בעיר העתיקה בבאר שבע, או בהימצאותה של דרך ראשית מרכזית שהיא חלק מרשת הדרכים ההיסטורית כמו בשכונה המרכזית בכפר סבא, שכונת דרום רחוב ויצמן. בנוסף לכך, ניתן להבחין

שדגם הרחובות ההירארכי בקטגוריה C מאופיין בחוסר רציפות הבא לידי ביטוי מובהק בריבוי רחובות ללא מוצא ובדרגת פיתול גבוהה המעודדת סגירות של השכונות ובתוך כך מהווה חסם לתנועה של הולכי רגל בין שכונות, כמוצג באיור 4.5 בשכונות נווה זאב בבאר שבע ורובע י' באשדוד.

השכונות בקטגוריות השונות נבדלות גם בהיקף ובהתפלגות שימושי הקרקע. הודות למרכזיותן התפקודית של השכונות הותיקות במרכזי הערים (A) היקף שימושי הקרקע שאינם משמשים למגורים בהן גדול באופן משמעותי בהשוואה לשכונות הקצה בערים הותיקות (B) ולשכונות בערים חדשות (C). בשכונות הקצה בערים הותיקות חלקם של שימושי הקרקע המסחריים נמוך במיוחד, וגדול חלקם היחסי של שימושי קרקע הציבוריים המיועדים לתיפקוד השכונה כדוגמת בתי ספר. בשכונות החדשות, שהוקמו כאמור על פי עיקרון התכנון של 'יחידת השכנות', יש משקל משמעותי גם לשימושי קרקע מסחריים. בהשוואה לשכונות הותיקות שבהם המסחר נוטה להשתרע על פני כל חלקי השכונה, ולאורך הרחובות, בשכונות החדשות הוא נוטה להתרכז באזורים מוגדרים. להבדל המורפולוגי והתפקודי של טיפוסי השכונות שזיהינו השפעה גם על דרגת ההתאמה בין ערכי המרכזיות להתפלגות שימושי הקרקע. ניתן להמחיש את ההבדל בדרגת התאמה זו בעזרת שתי שכונות בבאר שבע, העיר העתיקה ונווה זאב, הסמוכות גיאוגרפית אחת לשניה (איור 4.4). ניתן להבחין שבעיר העתיקה קיימת התאמה בין דרגת האינטגרציה המרחבית המקומית לבין התפלגות שימושי הקרקע בעוד שבשכונת דרום החדשה ההתאמה חלשה וחלקית בלבד (איור 4.6).

להבדלים המורפולוגיים, התפקודיים והגיאוגרפיים שאותו במחקר זה בין שכונות מגורים, והמהווים את היסודות לבניית קטגוריות של שכונות עשויה להיות השפעה פוטנציאלית על דפוס התנועה של הולכי רגל ועל התפלגותה של תנועה זו בשכונות מגורים.



שכונה 3 – דרום רחוב ויצמן, כפר סבא

שכונה 1- העיר העתיקה, באר שבע

איור 4.3: קטגוריה A: שכונות שתוכננו בגישת תכנון קדם-מודרנית וממוקמות במרכז העיר



שכונה 2 – כיסופים, כפר סבא שכונה 4 – דגניה, כפר סבא

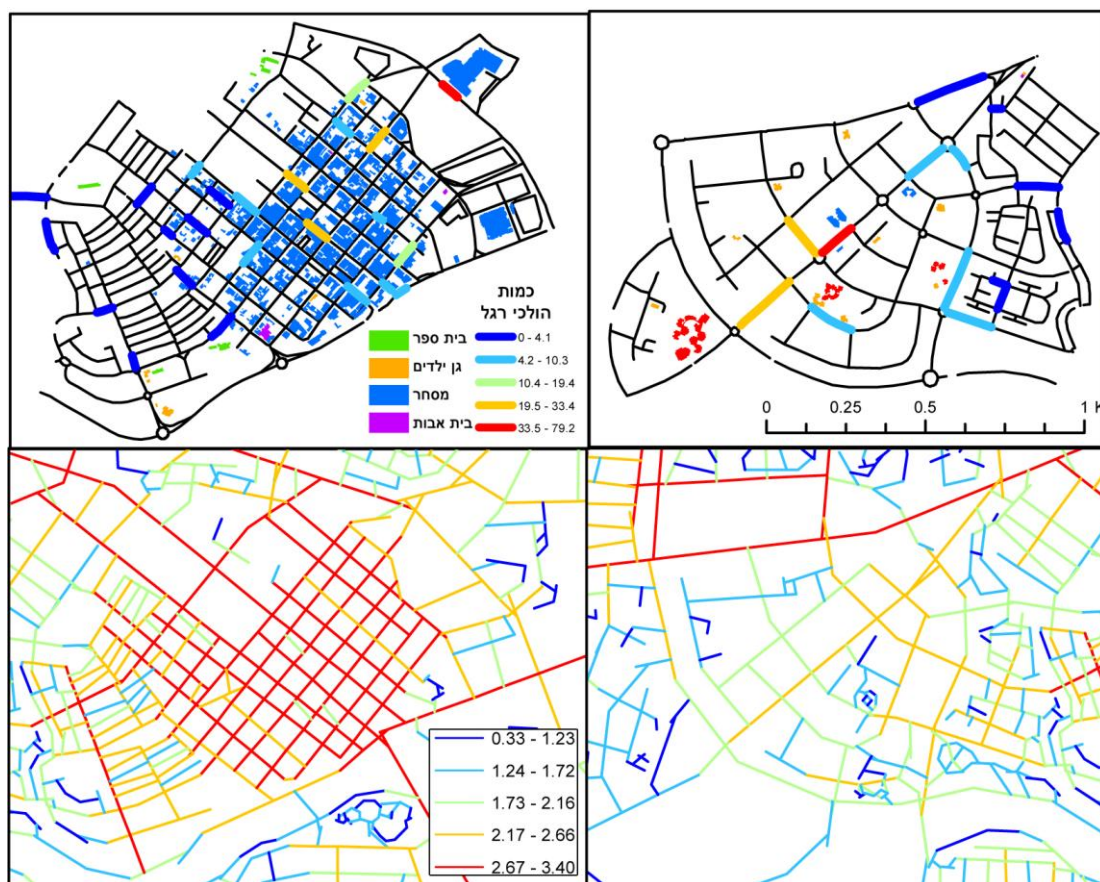
איור 4.4: קטגוריה B: שכונות שתוכננו בגישת תכנון קדם-מודרנית וממוקמות בפריפריה של העיר



שכונה 2 – רובע י', אשדוד

שכונה 2 - נווה זאב, באר שבע

איור 4.5: קטגוריה C: שכונות שהוקמו בגישת תכנון מודרנית



שכונה 1 – העיר העתיקה (ותיקה), באר שבע

שכונה 2 – נווה זאב (חדשה), באר שבע

איור 4.6: התאמה בין דרגת האינטגרציה ברשת הרחובות (אינטגרציה מקומית) לבין התפלגות שימושי הקרקע בשכונה ותיקה (קטגוריה A) ובשכונה חדשה (קטגוריה C)

4.4 בניית מודלים לחיזוי לקטגוריות השונות של טיפוסים שכונות מגורים

לצורך בחינת יכולת הניבוי של כל אחת מהקטגוריות של טיפוסים השכונות נבנה מודל רגרסיה ליניארית רבת משתנים בשיטת 'Backward'. המודל נבנה בנפרד לכל אחת מהקטגוריות של השכונות, ולכל אחת מקבוצות האוכלוסיה (המשתנים התלויים). דרך הניתוח המבחינה בין טיפוסים שכונות זכתה לתימוכין כאשר מקדמי הקטגוריות המייצגים טיפוסים שכונות נמצאו מובהקים סטטיסטית. כמו כן, ההחלטה על שיטת 'Backward', שבאמצעותה ייבחרו המנבאים "הטובים ביותר" על פי הקריטריונים הסטטיסטיים המקובלים בשיטה זו, מהווה מענה לבעיה של מולטיקולינאריות - קשר ליניארי בין המשתנים הבלתי תלויים.

ערכי מקדם הקורלציה המוצגים בטבלה 4.5 מלמדים שניתן לחזות את תנועת הולכי הרגל של כלל האוכלוסיה, ושל אוכלוסיית הקשישים, ברמה של R^2 הגבוהה מ-0.6 וזאת בכל טיפוסים השכונות. לעומת זאת, רמת החיזוי של מודל הרגרסיה שנבנה לאוכלוסיית הילדים נוטה להיות נמוך יותר; מלבד במרכזי הערים הותיקות (קטגוריה A) שם יכולת הניבוי גבוהה ומספקת בהחלט ($R^2 = 0.75$), הן בפריפריה של הערים הותיקות (קטגוריה B) והן בשכונות החדשות (קטגוריה C) רמת הניבוי נמוכה יחסית ועומדת על 0.40-0.44. בהתאמה.

טבלה 4.5: מקדם קורלציה (R^2) של מודל הרגרסיה על פי קטגוריות של שכונות וקבוצות אוכלוסיה ($P < 0.05$).

קטגוריה C	קטגוריה B	קטגוריה A	
0.472	0.844	0.842	כלל האוכלוסיה
0.604	0.779	0.836	קשישים
0.399	0.439	0.754	ילדים

החקירה שנערכה כאן הובילה לקבוצת מודלים לניבוי תנועת הולכי רגל לכל אחת מקבוצות האוכלוסיה הנבחנות – כלל האוכלוסיה, קשישים וילדים ולכל אחד מטיפוסי השכונות – A, B, C. המודלים מוצגים בטבלה 4.6 כוללים את כל המשתנים הנכללים בהם, ובתוך כך המשתנים המובהקים מכלל המשתנים שנבחנו. תיאור מפורט של המודלים הכולל את מובהקות המשתנים, מקדמי המשתנים (B , β) מוצג בנספח 6.

טבלה 4.6: נוסחאות מודל הרגרסיה שחושבו לכל אחת מטיפוסי השכונות ולכל אחת מקבוצות האוכלוסיה במסגרתן – כלל האוכלוסיה, ילדים וקשישים

$\begin{aligned} LSegTotal = & -10.764 - 4.003 * StreetGrid + 0.699 * SegComFront \\ & + 0.578 * SegEldFront + 0.784 * IntegR3 + 0.523 * AxMD + 3.012 * AxMDR3 + 15.616 * MD \\ & + 1.74 * MDR250 + 0.138 * TOT_DEN_S - 0.001 * TOT_AB_PO_S + 2.252 * MDR500 \end{aligned}$		קטגוריה A
$\begin{aligned} LSegTotal = & -234.583 - 0.699 * StreetGrid + 0.395 * SegComFront \\ & 0.498 * SegSchFront - 0.058 * AxCon + 8.212 * Integ + 2.737 * IntegR3 + 43.595 * IntenR3 \\ & + 3.813 * AxMD + 62.296 * AxMDR3 + 8.155 * MDR2500 + 0.001 * MMD + 0.005 * MMDR2500 + \\ & 0.031 * TOT_DEN_S + 0.008 * MMDR500 - 0.006 * MMDR1500 - 0.003 * MMDR4000 \end{aligned}$		קטגוריה B
$\begin{aligned} LSegTotal = & 5.33 + 0.901 * SegComFront + 0.065 * AxCon + 2.583 * Integ - 11.024 * Intensit \\ & - 2.065 * IntenR3 + 9.834 * MDR2500 + 3.694 * MDR750 - 0.003 * MMDR2500 + 0.122 \\ & * TOT_DEN_S - 9.028 * MDR1500 + 0.001 * MMDR4000 \end{aligned}$		קטגוריה C
$\begin{aligned} LSegKids = & -121.943 - 4.523 * StreetGrid + 0.283 * SegComFront \\ & + 2.911 * IntegR3 + 21.905 * IntenR3 + 0.957 * AxMD + 36.622 * AxMDR3 + 15.721 * MD \\ & + 3.572 * MDR250 - 4.045 * MDR750 - 0.003 * MMDR2500 + 0.252 * TOT_DEN_S \\ & - 0.001 * TOT_AB_PO_S - 0.013 * MMDR500 + 0.007 * MMDR1500 \end{aligned}$		קטגוריה A
$\begin{aligned} LSegKids = & -2.674 + 0.441 * SegComFront + 0.442 * SegSchFront \\ & + 0.006 * MMDR2500 + 0.206 * L_Choice - 6.212 * MDR4000 \\ & - 0.003 * MMDR4000 \end{aligned}$		קטגוריה B
$\begin{aligned} LSegKids = & -1.245 + 0.589 * SegComFront + 0.888 * SegSchFront + 3.196 * Integ \\ & - 9.626 * Intensit + 6.352 * MDR750 - 0.003 * MMDR2500 + 0.131 * TOT_DEN_S \\ & - 3.614 * MDR500 + 0.002 * MMDR4000 \end{aligned}$		קטגוריה C

קטגוריה A

$$\begin{aligned} LSegEld = & -1.261 - 3.452 * StreetGrid + 0.727 * SegComFront + 0.76 * SegEldFront \\ & + 0.07 * Axcon + 1.992 * IntegR3 - 11.028 * Intensit - 8.226 * IntenR3 + 0.716 * AxMD \\ & + 71.895 * MD + 2.231 * MDR250 - 0.183 * L_Choice + 0.159 * TOT_DEN_S \\ & - 35.663 * MDR4000 \end{aligned}$$

קטגוריה B

$$\begin{aligned} LSegEld = & 0.694 - 0.946 * StreetGrid + 0.499 * SegComFront - 1.008 * SegEldFront \\ & + 1.297 * MDR250 + 0.002 * MMD + 0.014 * MMDR250 + 0.176 * L_Choice \\ & + 0.039 * TOT_DEN_S - 0.005 * MMDR4000 \end{aligned}$$

קטגוריה C

$$\begin{aligned} LSegEld = & 4.398 + 0.711 * SegComFront + 0.066 * Axcon + 5.71 * Integ - 29.582 * Intensit \\ & - 0.37 * AxMD + 0.553 * MDR250 + 12.111 * MDR2500 + 6.257 * MDR750 + \\ & 0.008 * MMDR250 + 0.111 * TOT_DEN_S - 5.404 * MDR500 \end{aligned}$$

קשישים

עיון בהרכב המשתנים המשתתפים בכל אחד מהמודלים של הקטגוריות הנבחנות ובמשקלם היחסי (ערכי Beta), מלמד על כך שהחלוקה לקטגוריות מעצימה את הדומיננטיות שיש לתכונות המרחביות, שהתגלתה בבחינות הסטטיסטיות המקדימות שהוצגו למעלה. התוצאות מראות גם שמשקלם של המשתנים המרחביים של אינטגרציה (moving-to) כדוגמת אינטגרציה גלובלית ועומק גיאומטרי גלובלי דומיננטיים בצורה משמעותית בהשוואה למשתנים המייצגים את מרכזיות הרחובות מבחינת המעבר דרכם כדי להגיע ממקום למקום (moving-through), כדוגמת מדד הבחירה הגלובלית. יחד עם זאת, למדדים המרחביים השפעה דיפרנציאלית על האוכלוסיות הנבחנות: למשתנים המרחביים המקומיים, כדוגמת מדד האינטגרציה המקומית, השפעה חזקה על אוכלוסיית הקשישים והילדים, אך השפעתו חלשה יחסית על שאר האוכלוסיה שלגביה דומיננטיים המשתנים המרחביים הגלובליים של אינטגרציה מרחבית גלובלית, הן הטופולוגית והן הגיאומטרית.

המודלים שנבנו לכל קטגוריה של טיפוס שכונה נבדלים בעיקר על פי סוגי המרחק עליהם מתבססים המשתנים המרחביים. בערים הותיקות דומיננטיים המדדים המבוססים על מרחקים טופולוגיים וגיאומטריים כדוגמת מדד עומק ממוצע טופולוגי גלובלי ועומק ממוצע גיאומטרי גלובלי (MD, AxMD). דהיינו, על פי מודל הרגרסיה שנבנה, תנועת הולכי הרגל במרכזן של ערים ותיקות תתרכז בעיקר ברחובות ראשיים מבחינת העיר בכללותה, ובמיוחד בכאלה שנגישותם הטופולוגית גבוהה. בשכונות שמחוץ למרכז העיר בערים הותיקות תתרכז תנועת הולכי הרגל במקטעי רחובות ראשיים מבחינת הסביבה הקרובה של שכונת המגורים, כלומר שדרגת האינטגרציה המקומית, הנמדדת על פי העומק הטופולוגי שלהם (AxMDR3) גבוהה במיוחד, או מקטעי הרחוב שמשלבים ערכים גבוהים של נגישות מקומית וגלובלית בעת ובעונה אחת (כדוגמת מדדי intensity). לעומתן בערים החדשות יש משקל רב למשתנים המתבססים על המרחק המטרי – כדוגמת עומק ממוצע מטרי (מדדי MMDR*) בטווחי מרחק שונים.

4.5 שלב התיקוף

לשלב התיקוף נבחרו ארבע שכונות מגורים נוספות בערים כפר סבא והוד השרון. שכונות אלה מייצגות שני טיפוסי שכונות שאותרו בשלב הקודם שתואר בסעיף 4.3 לעיל, וזאת על סמך מיקום השכונה במערך העירוני והגישה התכנונית לפיה הוקמה השכונה. בכל עיר נבחרה שכונה אחת במרכז העיר שמתוכננת לפי גישת תכנון קדם-מודרנית ושכונה אחת הממוקמת בפריפריה שתוכננה בגישת תכנון מודרנית. באיור 4.7

מוצגות השכונות שנבחרו לשלב התיקוף בערים כפר סבא והוד השרון. לגבי כל שכונה נאספו נתונים על פי אותם שלבי איסוף המידע שבוצעו עבור ארבע עשרה שכונות המחקר (כמתואר בפרק 3.2 ו-3.3 לעיל). על בסיס המידע שנאסף נעשה ניתוח של תחביר המרחב כדי לחשב את תכונות המרכזיות של מקטעי הרחובות ברשת הדרכים. כמו כן, נערכה מדידה לספירת הולכי הרגל באותה מתכונת שבה נערכו המדידות בשכונות המחקר.

ניתן להבחין בהבדלים בין השכונות בכל הנוגע דגם הרחובות. בשכונות המרכזיות (שכונת מרכז דרום ויצמן, מס 5 בכפר סבא, ושכונת שרת, מס' 1 בהוד השרון) הדגם נוטה להיות דגם של "רשת" שרמת האינטגרציה בו גבוהה עם חיבור טוב לעיר. לעומת זאת בשכונות הקצה (שכונת גאולים, מס' 6 בכפר סבא, שכונת רמות מנחם, שכונה מס' 2 בהוד השרון) דגם הרחובות נוטה להיות הירארכי, מקוטע, ועם חיבור חלש יותר לעיר. כפי שנראה בהמשך, עשויה להיות לכך השפעה על התפלגות נפח התנועה ועל היכולת לנבא התפלגות של נפח תנועת הולכי רגל ברמת השכונה.



איור 4.7 השכונות הנבחרות לשלב התיקוף בערים הוד השרון (מימין) וכפר סבא (משמאל)

רמת המתאם בין נפח תנועת הולכי רגל שנמדד בספירות התנועה לבין נפח תנועת הולכי רגל החזוי מיישום מודל הרגרסיה בכל אחת מהשכונות, ולגבי כל אחת מקבוצות האוכלוסיה, מוצגת בטבלה 4.7. עיון בתוצאות מלמד על הבדל ברור ומשמעותי בין השכונות שממוקמות במרכזי הערים כפר סבא והוד השרון לבין השכונות שממוקמות בקצה ערים אלו. רמת החיזוי משמעותית רק בשכונות הממוקמות במרכז העיר. כאשר החיזוי נערך לכלל האוכלוסיה מתקבל מתאם (R) שני בין 0.74 (הוד השרון) ל-0.77 (כפר סבא), ובהתאמה מקדם הקורלציה (R^2) נע בטווח שבין 0.56-0.60. לעומת זאת, בשכונות הקצה הערכים נמוכים באופן משמעותי – המתאם נע בין 0.33-0.49, ומקדם הקורלציה נע בין 0.11-0.24.

הפער ברמת החיזוי בין טיפוסי השכונות אף מחריף כאשר מדובר על אוכלוסיית הקשישים והילדים. מקדם הקורלציה של המודלים שנבנו לאוכלוסיות אלו עומד בהתאמה על 0.30 ו-0.31 בכפר סבא, ועל 0.28 ו-0.42 בהוד השרון. בשכונות הקצה לעומת זאת, נע ערכו של מקדם הקורלציה (R^2) בטווח של 0.05-0.08, להוציא את אוכלוסיית הקשישים בשכונת רמות מנחם שם ערך המקדם הוא 0.21. רמת החיזוי הנמוכה יחסית של אוכלוסיות אלה מתחזקת אם כן כאשר מדובר על שכונות קצה שהוקמו בגישת תכנון מודרני.

טבלה 4.7: המתאם (מקדם קורלציה R^2) בין מרכזיות ברשת הרחובות והתפלגות שימושי קרקע עם תנועת הולכי רגל – השוואה בין ערים וקבוצות אוכלוסיה (N=68)

מספר השכונה	שם שכונה	אוכלוסיה	מתאם (פירסון)	מקדם קורלציה R^2
5	שכונת מרכז דרום ויצמן, כפר סבא	כלל האוכלוסיה	0.77	0.60
		קשישים	0.57	0.30
		ילדים	0.55	0.31
6	שכונת גאולים, כפר סבא	כלל האוכלוסיה	0.49	0.24
		קשישים	0.23	0.05
		ילדים	0.27	0.07
1	שכונת שרת, הוד השרון	כלל האוכלוסיה	0.74	0.56
		קשישים	0.53	0.28
		ילדים	0.61	0.42
2	שכונת רמות מנחם, הוד השרון	כלל האוכלוסיה	0.33	0.11
		קשישים	0.48	0.21
		ילדים	0.30	0.08

ניתן לקבוע ככלל שרמת החיזוי בשתי השכונות הממוקמות במרכזן של הערים גבוהה הרבה יותר, ומשמעותית בהשוואה לשכונות הקצה. התפלגויות נפח התנועה הנמדד ונפח התנועה החזוי על פי מודל הרגרסיה מוצגות באיורים 4.8-4.9, והתפלגויות תנועת הולכי רגל של ילדים וקשישים בשכונת מגורים נבחרת מוצגות באיור 4.10.

את ההסבר לרמת החיזוי הדיפרנציאלית של המודל ניתן לייחס לשני הבדלים עיקריים בין שני טיפוסים השכונות:

א. ההתאמה בין התפלגות דרגת המרכזיות להתפלגות שימושי הקרקע: כפי שצויין למעלה, לשכונות שהוקמו בגישת התכנון הקדם-מודרני מאפיינים הקרובים למבנה מורפולוגי-תפקודי המתפתח בתהליך אורגני, שאחד ממרכיביו הבולטים הוא ההתאמה בין התפלגות דרגת המרכזיות ברשת הדרכים (על פי ממדי האינטגרציה ומדדי 'הבחירה') לבין התפלגות שימושי הקרקע המושכים אליהם תנועת הולכי רגל (attractors). בהתחשב ביחס התלות בין התפלגות שימושי קרקע לדרגת המרכזיות ברשת הרחובות יש להתאמה זו השפעה ישירה על נפח התנועה. דהיינו, תנועת הולכי רגל זוכה להעצמה בזכות מרכזיות הרחוב וגם בזכות שימושי הקרקע, ולכך תרומה ליכולת הניבוי של התפלגות נפח תנועת הולכי רגל. בשכונות קצה שהתפתחו בגישה מודרנית לעומת זאת, ההתאמה בין שתי ההתפלגויות נמוכה יחסית ואפשר ששימושי קרקע אטרקטיביים לתנועת הולכי אינם ממוקמים ברחובות המרכזיים ברשת. כתוצאה מכך, תנועת הולכי רגל תתפלג בחלקים שונים של שכונת המגורים ללא העדפה מובהקת לחלק ממקטעי הרחובות מה שיקשה על יצירת מודל חיזוי טוב.

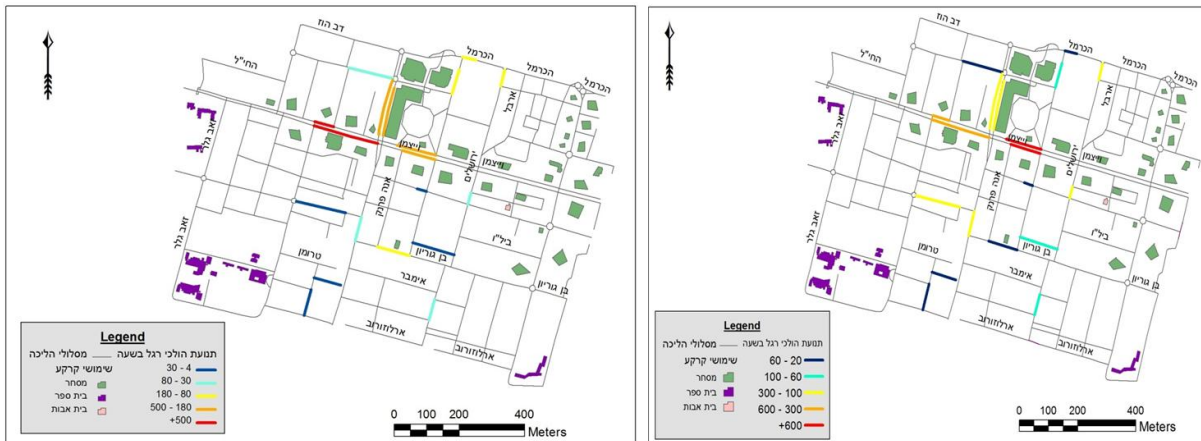
השוואה בין התפלגויות נפח התנועה הנמדד ונפח התנועה החזוי על פי המודל (איור 4.8) עשויה להמחיש טענה זו. עיון בשכונות הממוקמות במרכז הן בכפר סבא והן בהוד השרון מלמד שרמת הניבוי טובה בדרך כלל במקטעי רחוב מרכזיים שבהם ממוקמים שימושי קרקע מושכי קהל, ופחות טובה ברחובות משניים.

בולטת תופעה זו בשכונת מרכז הוד השרון בה יש התאמה טובה בין ערך נמדד לערך מנובא ברשת הדרכים הכוללת את חלקו הדרומי של רח' רמתיים, הרחוב המרכזי בהוד השרון והרחובות הסמוכים, שלהם ערכי 'אינטגרציה' ו-'בחירה' גבוהים במיוחד, ושבהם מרכז המסחר לעומת זאת, בחלקה הצפוני של דרך רמתיים אין מסחר בהיקף משמעותי וככל הנראה כתוצאה מכך קיים פער גדול בחלק זה של הרחוב בין ערך נמדד לערך חזוי. הנטייה לרמת ניבוי טובה יותר ברחובות מרכזיים בשכונות הממוקמות במרכז מאפיינת את כל האוכלוסיות הנבדקות. המחשה לכך מוצגת באיור 4.10 בו מוצגות גם התפלגויות תנועת הולכי רגל של ילדים וקשישים בשכונת מגורים נבחרת.

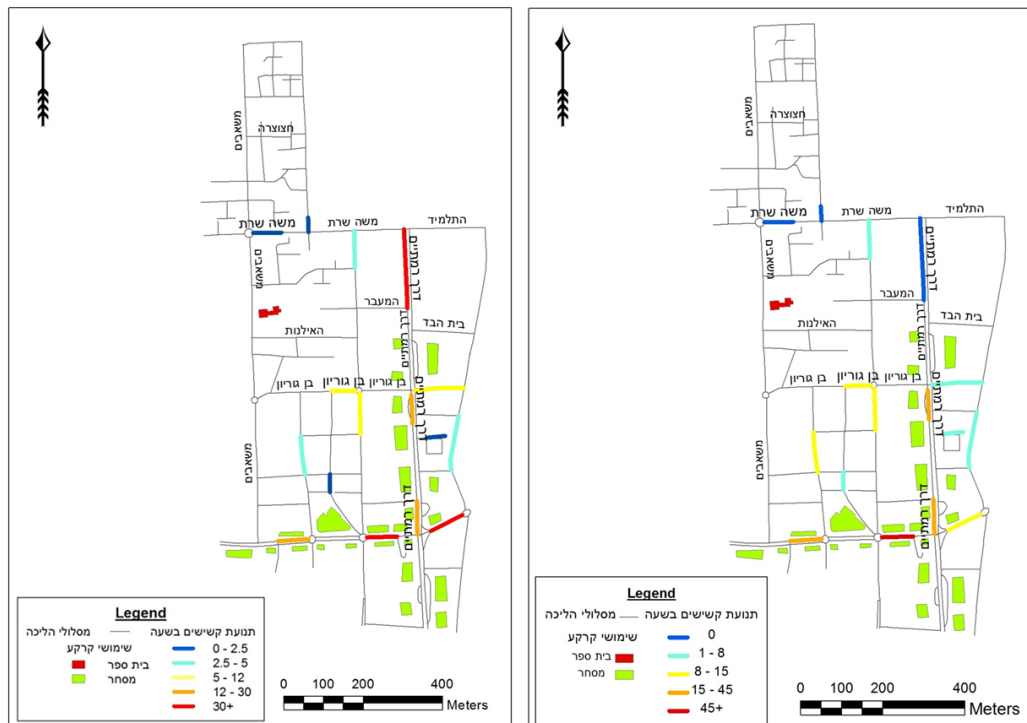
תופעה זו של חוסר התאמה בולטת עוד יותר בשכונות הקצה (איור 4.9). רבים המקטעים בהם קיים חוסר התאמה בין התפלגות שימושי הקרקע להתפלגות מרכזיותם ברשת הרחובות. כך לדוגמא, בשכונת גאולים בכפר סבא ניתן למצוא התאמה טובה בערכי שימושי הקרקע בחלק הצפון מזרחי הסמוך לרח' ויצמן בעוד שבחלקים אחרים המצויים במרכז השכונה ובקצותיה נמוכה יחסית ההתאמה בין מרכזיות ברשת הרחובות ומיקום שימושי הקרקע. ביטוי מובהק לתופעה זו ניתן למצוא במקטע הרחובות המצוי בקירבת צומת הרחובות המרכזיים דרך רמתיים וז'בוטינסקי בשכונת רמות מנחם בהוד השרון. ניתן להבחין שבמקטעי רחוב עם דרגת מרכזיות גבוהה ושבהם קיימים שימושי קרקע שאינם מגורים (מסחר, בית ספר ובית אבות) המתאם בין המדידה לניבוי גבוה יחסית בהשוואה למקטעי רחובות שבהם המרכזיות גבוהה אך אין בהם שימושי קרקע שאינם למגורים או לחילופין רחובות שבהם יש שימושי קרקע מושכי קהל אך מרכזיותם נמוכה. בעקבות חוסר העקביות של הקשר בין דרגת מרכזיות הרחוב למשקלו התפקודי המתגלה בשכונות שהוקמו בגישת תכנון מודרנית, קיים קושי לאתר חוקיות ברורה עליה יסתמך מודל הרגרסיה המתאר את ההשפעה על תנועת הולכי רגל, ומכאן גם חלשה יכולת המודל לנבא התפלגות של נפח תנועה בין רחובות בשכונת מגורים מטיפוס זה.

ב. הרכב האוכלוסיה וגודל נפח התנועה: הרכב וגודל נפח התנועה הוא מסימני ההיכר של אזור מרכז העיר המייחד אותו משאר חלקי העיר. כיוון שנפח התנועה בשכונות מרכז העיר גדול יותר בהשוואה לשכונות קצה, התנועה בהן יציבה ועקבית יותר. כפי שניתן להתרשם ממפות התפלגות התנועה, בשכונות הקצה רבים מקטעי הרחובות "השקטים" - בהם יש נפח קטן מאוד של תנועת הולכי רגל, העשוי להגיע לכדי הולכי רגל אחדים בלבד בשעה (איור 4.9). יש לכך פוטנציאל השפעה על יכולת הניבוי הסטטיסטי בכל אחד משני טיפוסים השכונות הנבחנות כאן. בעיה זו מחריפה כאשר מדובר על תנועת הילדים והקשישים שחלקם בנפח התנועה קטן אף יותר. להרכב נפח התנועה פוטנציאל השפעה גם על דפוס התנועה. בהתחשב בעובדה שבשכונות קצה ניתן לייחס את תנועת הולכי הרגל לאוכלוסיה הגרה במקום, בשכונות המרכז היא כוללת גם מבקרים המגיעים לצורכי מסחר וקבלת שירותים. לכך השפעה ישירה על דפוס התנועה. כאשר מדובר על מרכז העיר, נפח תנועת הולכי הרגל משתרע על אזור מצומצם יחסית כאשר דפוס התנועה העיקרי הוא בין הרחוב המרכזי לבין הרחובות הסמוכים לו ומכאן הרציפות של ערכי התנועה במוקדים של השכונות המרכזיות בכפר סבא ובהוד השרון (איור 4.8). בשכונות הקצה לעומת זאת התנועה משתרעת על פני השכונה בכללותה וכביטוי לפעילות תפקודית של תושבי השכונה והיא אינה רציפה. ניתן להבחין שבשכונות הקצה הנבחנות כאן, גאולים ורמות מנחם, מוקדי הפעילות ממוקמים הן במרכז השכונה והן בשוליה.

שכונת מרכז כפר סבא – כלל האוכלוסיה (מימין מדידה; משמאל ניבוי)



שכונת מרכז הוד השרון – כלל האוכלוסיה (מימין מדידה; משמאל ניבוי)

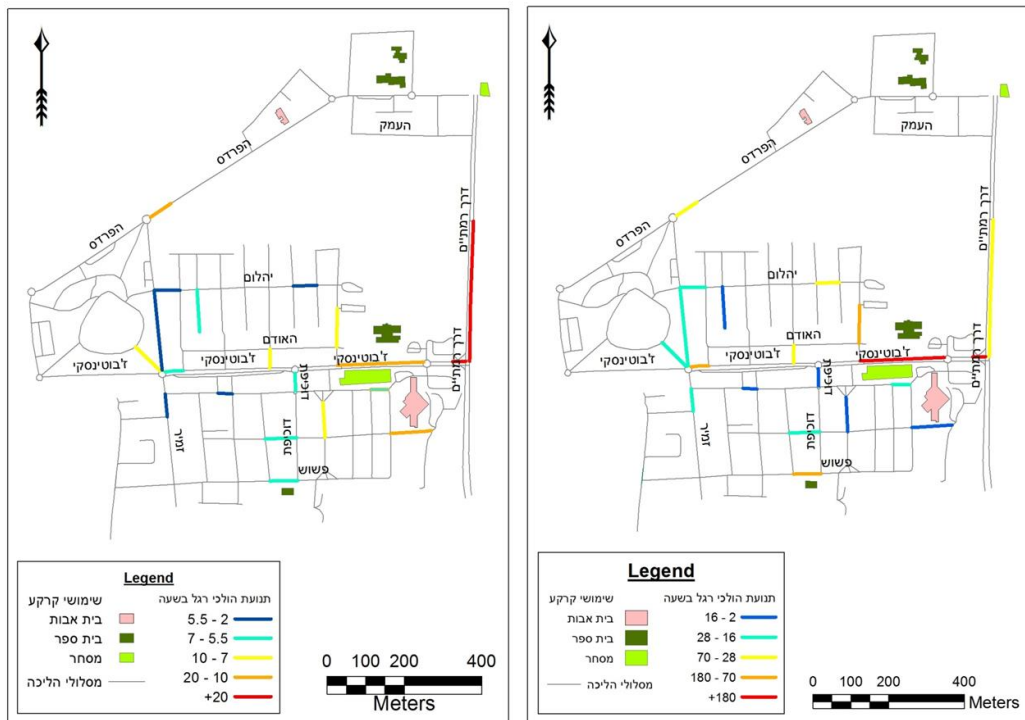


איור 4.8: תנועת הולכי רגל בשכונות מגורים במרכז כפר סבא (למעלה) ובמרכז הוד השרון (למטה) – מדידה לעומת ניבוי מודל (כלל האוכלוסיה). (מימין מדידה; משמאל ניבוי)

שכונת גאולים כפר סבא (שכונת קצה) - מימין מדידה; משמאל ניבוי – כלל האוכלוסיה

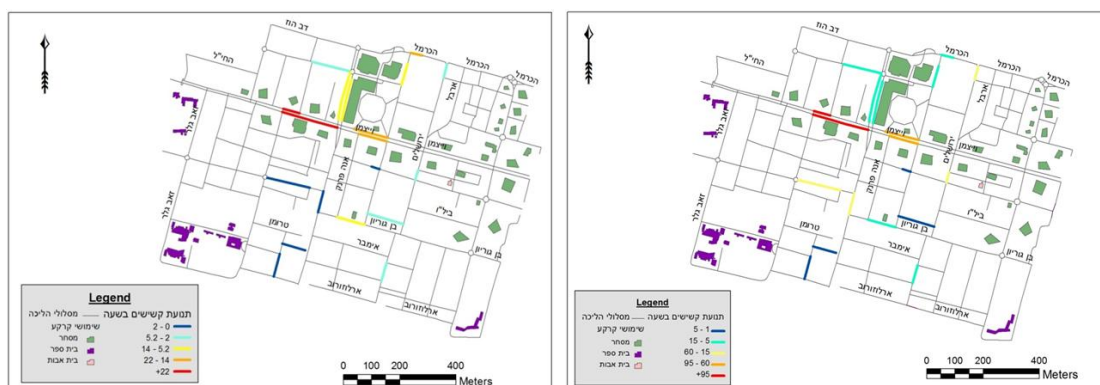


שכונת רמות מנחם הוד השרון (שכונת קצה) - מימין מדידה; משמאל ניבוי – כלל האוכלוסיה

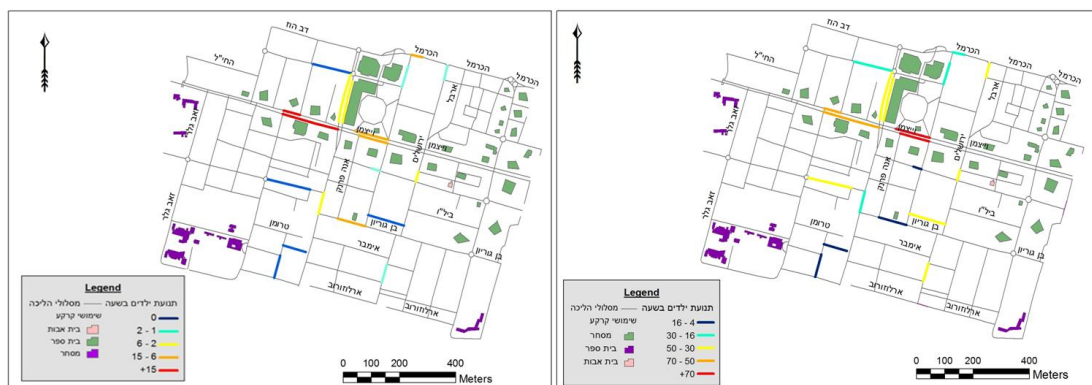


איור 4.9 : תנועת הולכי רגל בשכונות הקצה במרכז כפר סבא (למעלה) ובמרכז הוד השרון (למטה) – מדידה לעומת ניבוי מודל חיזוי (כלל האוכלוסיה).

שכונת מרכז כפר סבא - מימין מדידה; משמאל ניבוי – אוכלוסיית קשישים



שכונת מרכז כפר סבא - מימין מדידה; משמאל ניבוי – אוכלוסיית ילדים



שכונת מרכז כפר סבא - מימין מדידה; משמאל ניבוי – אוכלוסייה בגילאי 15-64



איור 4.10: תנועת הולכי רגל בשכונת מרכז כפר סבא – מדידה לעומת ניבוי (קשישים, ילדים ואוכלוסייה בגילאי 15-64).

מלבד בדיקת המתאם ומקדם הקולציה. הערכת רמת הניבוי של המודלים שיושמו על ארבע שכונות התיקוף כללה את בחינת השאריות לכל אחת מהאוכלוסיות הנבחות ואת מדד $RMSE$ (Root Mean Square Error). התוצאות מוצגות בטבלה 4.8. מן התוצאות עלה כי מדד ה- $RMSE$ בשני המשתנים: אוכלוסיית הילדים ואוכלוסיית הקשישים היה נמוך יחסית (2.5 ו-1.5, בהתאמה), בהשוואה לכלל האוכלוסייה ולאוכלוסייה בגילאי 15-64 (11.3 ו-13.3, בהתאמה). סטיית התקן של השאריות אף היא מעידה על כך.

טבלה 4.8: הערכת רמת הניבוי של מודל הרגרסיה בשכונות התיקוף

ילדים	קשישים	קבוצת גיל 15-64	כלל האוכלוסייה	
1.1	0.8	1.0	3.0	ממוצע של השאריות
2.3	1.3	13.4	11.0	סטיית התקן של השאריות
0.26	0.27	0.54	0.58	מתאם פירסון בין ערכי אמת וניבוי
2.512201	1.5036	13.338151	11.3	RMSE

לאחר סיום שלב התיקוף (ורק בסופו) נבנו מודלים של רגרסיה לארבע השכונות שנבחנו בשלב התיקוף על סמך הנתונים האמפיריים שנאספו בהם ובדרך דומה למודל שנבנה על בסיס ארבע עשרה השכונות שנבחנו בשלב הראשון, וזאת ללא קשר למודלים שנבנו לכל קטגוריה. מקדמי הקורלציה במודל הרגרסיה שנבנה לצורך הערכת תנועת כלל האוכלוסייה עומד בשכונות המרכז בכפר סבא ובהוד השרון על 0.76 ו-0.88, בהתאמה, בעוד שבשכונות הקצה הוא עומד על 0.62 ו-0.29 בהתאמה. יחד עם זאת, בניסיון להעריך תנועת ילדים וקשישים לא נמצאו בדרך כלל משתנים מובהקים. תוצאות אלה מהוות תימוכין לדרך שנבחרה כאן של בניית מודל שונה לקטגוריות של טיפוס שכונות המסתמך על מדגם גדול של מקטעי רחוב, ובתוך כך על ידע אמפירי נרחב ומגוון על הקשר בין תכונות הסביבה הבנויה והתפקודית לתנועת הולכי רגל. יחד עם זאת, דרך זו אינה מספיקה עדיין לניבוי בשכונות חדשות עקב המגוון הגדול שלהן בכל הקשור להשפעה על התפלגות הולכי רגל.

¹ מדד זה נועד להעריך את מידת הסטייה של האומדן. במחקר הנוכחי האומדן הוא התחזיות המתקבלות מקווי הניבויים. תחילה מחושבת ה-MSE אשר מבוססת על פונקציית ההפסד הריבועי, אך מאחר והערכים המתקבלים אינם באותן היחידות של המשתנה התלוי (באופן דומה לשונות); הוצא השורש הריבועי, וכך המדד מלמד על מידת הפער הממוצעת בין הערכים המנובאים לבין ערכי האמת של התצפיות.

4.6 סיכום

מחקר זה נועד לברר את הגורמים המשפיעים על התפלגות תנועת הולכי רגל מבוגרים, ילדים וקשישים ברחובות העיר, וזאת תוך ניסיון להשגת מטרה אופרטיבית: בניית מודל גנרי לחיזוי נפח תנועת הולכי רגל על פי נתונים קיימים, שיהיה ניתן ליישמו במרחבים עירוניים מגוונים ללא צורך בספירות הולכי רגל, או לכל הפחות להביאה למינימום.

חקירה אינטנסיבית של ארבע עשרה שכונות מגורים המייצגות את המרחב העירוני בישראל מלמדת על השפעתן של תכונות מורפולוגיות של רשת הדרכים, שימושי הקרקע, ותכונות דמוגרפיות על התפלגות תנועת הולכי רגל של קבוצות האוכלוסיה שנבחנו במחקר זה – ילדים, אוכלוסיה בקבוצת הגיל 15-64, וקשישים. יחד עם זאת משקלן של תכונות אלה עשוי להיות שונה בהתאם לעיר ואף לשכונה הנבדקת ומיקומה הגיאוגרפי בעיר. ככלל, נמצא שהמשתנים המרחביים נוטים להיות דומיננטיים בהשוואה למשתנים האחרים.

הניסיון לבנות מודל חיזוי ברמת העיר נחל הצלחה בניבוי חלק מהערים בלבד – בשלוש ערים: כפר סבא, בת ים ואשדוד, רמת החיזוי (מקדם קורלציה R^2) היתה גבוהה מ-60% אך בבאר שבע רמת החיזוי היתה נמוכה מ-40%. יתירה מכך, יכולת חיזוי תנועת הולכי רגל ילדים וקשישים הנוטה להיות נמוכה יותר בהשוואה לכלל האוכלוסיה, נמצאה נמוכה במיוחד בבאר שבע. על סמך תוצאות אלה ניתן להסיק שלמודל לחיזוי נפח תנועה בעיר שנבנה על סמך המתודולוגיה המקובלת בספרות המדעית, ושיושמה במחקר זה על סמך נתונים אמפיריים במקטעי רחוב מדגמיים (כ-60 מקטעי רחוב בממוצע לעיר במחקר הנוכחי) פוטנציאל ניבוי גבוה ומספק אך לא בכל מקרה, ולכן אין להסתפק בו, במיוחד אם עניינו במודל אופרטיבי לניבוי במקומות ספציפיים בעיר.

בחינה ויזואלית וסטטיסטית של התפלגות נפח התנועה של הולכי רגל ב-14 שכונות מגורים (ששימשו את שלב המחקר), תוך התחשבות בהתפלגות שימושי קרקע הרלוונטיים לכל אחת מהאוכלוסיות הנבחות, ומידת התאמתם להתפלגות המרחבית של דרגות המרכזיות הטופולוגית והמטרית ברשת הדרכים, הראתה שמודל לחיזוי נפח תנועה צריך להיות מכוון לרמה של שכונת מגורים. זאת עקב השונות הרבה בין השכונות בישראל בכל הקשור למשתנים המשפיעים על תנועת הולכי רגל, ולמשקלם בהקשר לכל אחת מהאוכלוסיות הנבדקות. לאור ממצאים אלה, גובשה מסגרת מתודולוגית לבניית מודל לחיזוי נפח תנועת הולכי רגל המתאימה במיוחד לקונטקסט העירוני בישראל. מסגרת זו מגדירה 3 קטגוריות של טיפוס שכונות מגורים שאותן על סמך חקירה אמפירית: קטגוריה הכוללת את השכונות הותיקות שתוכננו בגישת תכנון קדם-מודרנית וממוקמות במרכז העיר, קטגוריה הכוללת את שכונות הקצה הותיקות בערים אלה, וקטגוריה שלישית, הכוללת את השכונות החדשות שהוקמו בגישת תכנון מודרנית שממוקמות הן בערים החדשות והן בשולי הערים הותיקות.

שלב התיקוף שנערך על פי מתודולוגיה זו התבסס על 4 שכונות מייצגות בערים כפר סבא והוד השרון. מטרתה של בדיקה זו היתה לברר: האם המודל הגנרי שנבנה לחיזוי נפח תנועה בשכונות מגורים אכן מצליח לעשות זאת בשכונות נוספות שלא על פיהן הוא נבנה.

על סמך הערכת המודלים הגנריים לחיזוי נפח תנועת הולכי רגל שנבנו לשתי קטגוריות של שכונות – שכונות ותיקות שתוכננו בגישת תכנון קדם-מודרנית, הנמצאות במרכז העיר ושכונות קצה חדשות שתוכננו בגישת תכנון מודרנית – ולכל אחת מקבוצות האוכלוסיה – ניתן לקבוע שהמודל שנבנה על סמך ידע אמפירי שצברנו על סמך ארבע עשרה שכונות המחקר (בהתבסס על ספירות תנועה) מאפשר לנבא בצורה משמעותית ומספקת תנועת הולכי רגל בקטגוריה אחת בלבד של שכונות – שכונות ותיקות הממוקמות במרכז העיר. בשכונות מטיפוס זה המתכוננות על בסיס רשת רחובות קדם-מודרנית רמת החיזוי גבוהה

יחסית לגבי כל קבוצות האוכלוסיה; מתאמי פירסון נעים בין 0.53 ל-0.77. לעומת זאת, בשכונות הקצה שתוכננו בהתאם לגישת התכנון המודרנית רמת החיזוי נמוכה יחסית לגבי כלל האוכלוסיה, ונמוכה במיוחד לגבי הולכי רגל ילדים וקשישים; מתאמי פירסון הנעים בין 0.23 ל-0.49. בהתאם לממצאים אלה נדרש מחקר נוסף שיתמקד בשכונות אלה, שיתבסס על תצפיות נוספות וארוכות יותר של תנועת הולכי הרגל, תוך התחשבות באופי המיוחד של שכונות מסוג זה הן בערים החדשות והן בערים הוותיקות.

5. מסקנות

הממצאים העולים ממחקר זה לגבי הגורמים המעורבים בהתפלגות נפח בתנועה בין רחובות העיר או שכונות המגורים עולים בקנה אחד עם ממצאים אמפיריים המתקבלים בערים אחרות בעולם, שהוצגו בסעיף 2. יחד עם זאת לעיר הישראלית ייחוד משלה שניכר בהבדלים המורפולוגיים והתפקודיים ביו ערים, ושכונות מגורים במסגרתן, שמקורם העיקרי בגישת התכנון לפיה הוקמו.

חקירה אינטנסיבית של שכונות מגורים שנבדלות בגישת התכנון לפיה הוקמו, ובתוך כך במבנה רשת הדרכים, ובהתפלגות שימושי קרקע כדוגמת מוסדות ציבור ומסחר, מגלה שלא ניתן לבנות מודל גנרי המסוגל לחזות תנועת הולכי רגל לכל עיר ולכל שכונת מגורים. המסקנה היא אם כן שלמודלים גנריים שבנייתם מותאמת לטיפוסי שכונות מגורים פוטנציאל להצלחה לחיזוי תנועת הולכי רגל, ובכלל זה גם הולכי רגל ילדים וקשישים. יישום מודלים שנבנו בדרך זו בשכונות מגורים בהוד השרון וכפר סבא (בשלב התיקוף) מלמד על הצלחה חלקית בחיזוי תנועת הולכי רגל, רק של המודל הגנרי שנבנה לשכונות מגורים שתוכננו בגישה קדם מודרנית.

מהערכת המודלים לחיזוי בשכונות מגורים בשלב התיקוף עולה ממצא חשוב שלפיו יכולת הניבוי של תנועת הולכי רגל בשכונות מגורים שממוקמות בעיר שנכללה במחקר האמפירי שעליו התבססה בנייתו של מודל זה דומה לשכונות מגורים שלא נכללה במחקר האמפירי; כולת הניבוי בשכונות רמות מנחם בהוד השרון (שלא נכללה במחקר האמפירי) אינה שונה מהותית מיכולת הניבוי בשכונות גאולים בכפר סבא (שנכללה במחקר האמפירי). כך גם המצב לגבי השכונות החדשות – אין הבדל מהותי בין השכונה הממוקמת בכפר סבא לזו הממוקמת בהוד השרון. יחד עם זאת, ממצא זה צריך למצוא לו ביסוס בעזרת יישום המודל הגנרי בשכונות ותיקות נוספות תוך הקפדה על גיוון של שכונות מטיפוס זה. ביסוס כזה יהווה כמובן בשורה חשובה המצביעה על אפשרות לבניית מודל גנרי ללא צורך באיסוף נתונים אמפיריים.

למחקר ישנן גם מסקנות הנוגעות למתודולוגיה הרצויה בבניית מודלים לחיזוי תנועת הולכי רגל בקונטקסט העירוני בישראל. במסגרת המחקר הנוכחי יושומו שיטות החקירה המתקדמות ביותר בתחום של תנועת הולכי רגל וזאת בהתחשבות בכל הידע התיאורטי והאמפירי הרלוונטי שנצבר עד היום על סמך ערים שבנויות בצורות מגוונות. ייחודן התפקודי והמורפולוגי של ערים בישראל ושל שכונות מגורים בפרט, חייב מציאת דרך מתאימה לייצוג היחס בין תנאי הסביבה הבנויה לבין תנועת הולכי רגל בקונטקסט העירוני הישראלי. דרך זו הוכיחה את הפוטנציאל שלה באופן חלקי לגבי שכונות מגורים שתוכננו בגישה קדם מודרנית. כדי להוציא פוטנציאל זה מהכוח אל הפועל גם בשכונות חדשות שתוכננו בגישה מודרנית, ושכיוותן רבה בישראל, אנו מתכננים להמשיך דרך זו תוך פיתוח מתודולוגיה מתאימה שתתחשב בסגירות של שכונות מסוג זה, וניתוקן ההדדי זו מזו, ומן המרחב העירוני הסובב אותן. מתודולוגיה זו תסתמך על הגישה של תחביר המרחב אך לא רק דרך התייחסות לקונטקסט העירוני כמקובל בגישה זו, אלא גם לקונטקסט השכונתי. דהיינו חישוב אינטגרציה מרחבית על סמך רשת הדרכים השכונתית בנפרד. מסקנה מתודולוגית נוספת נוגעת למספר התצפיות בכל שכונת מגורים. במחקר הנוכחי נבחרו כ-60 מקטעי רחוב

בממוצע לעיר וזאת על סמך מחקרים קודמים בארץ ובחו"ל. השונות בהתנהגותן של שכונות המגורים בכל הקשור לתנועת הולכי רגל מחייבת את הגדלת היקף ספירות התנועה ואורכן במהלך היום.

מגבלה נוספת של המחקר, בדרך ליצירת מודלים גנריים של תנועת הולכי רגל בישראל היא התרכזותו בערים חילוניות בינוניות במישור החוף. יש להרחיב את המודל לבדיקתם של ישובים ושכונות חרדיות, המתאפיינות במספר גבוה יותר של ילדים, ובתנועה רבה יותר של מבוגרים במרחב הציבורי במשך היום, לישובים ערביים המתאפיינים אף הן באוכלוסייה צעירה יותר, בבינוי נמוך, ובהתפתחות הדרגתית ואורגנית, ולישובים בטופוגרפיות הרריות. אנו ממליצים כי הרשות תמשיך ליזום מחקרים כדי להרחיב את המודלים הגנריים כך שיעמדו לרשות רשויות שונות בבואן לבצע תכנון לשיפור מרחב ההליכה ברגל ביישוב.

המסקנה הכללית של המחקר היא שהדרך להשגת מודל גנרי אינה בפיתוח מתודולוגיה שתחייב ספירות תנועה בכל עיר או שכונת מגורים בהן יש לנו עניין להעריך ולחזות נפח תנועת הולכי רגל, אלא בניסיון לגבש מודל גנרי מתאים יותר לטיפוסי השכונות השונים. לצורך זה נדרש מחקר אינטנסיבי שיכלול מגוון רחב של שכונות שהוקמו על פי גישת תכנון מודרנית שבהן תתבצענה ספירות תנועה בהיקף גדול תוך שימוש בשיטת ניתוח של רשת הדרכים בגישה המתאימה לייצוג סגירותן המרחבית במרחב העירוני. מחקר כזה יאפשר להתרכז ביחס שבין המאפיינים המורפולוגיים של רשת הדרכים למערך שימושי הקרקע, העומד ביסוד תיפקודן של שכונות מגורים מטיפוס זה.

למחקר זה עשויות להיות השלכות יישומיות בהקשר של בטיחות ותאונות דרכים, ובאופן ספציפי עבור אוכלוסיית הולכי הרגל הילדים והקשישים. מודל תנועה עבור הולכי רגל ובפרט עבור אוכלוסיית הילדים והקשישים יכול לסייע בעיקר בזיהוי מתאם בין מקומות בהם יש נוכחות רבה של הולכי רגל קשישים וילדים לבין מקומות מסוכנים מבחינת תחבורתית שבהם אין התחשבות מספקת בהולכי רגל. זיהוי כזה יכול לאפשר ואף לעודד נקיטת פעולות המתחשבות במגבלות פיזיות וקוגניטיביות של ילדים וקשישים בניסיון להפחית את מידת פגיעותם, כדוגמת התקנת שילוט מתאים, תכנון רמזורים (משך שהות הרמזור), אמצעים להערכת מרחקים, הגבלת מהירות תנועה ברחוב וכד'. מודל תנועה כזה יכול להיות מבוצע באופן ספציפי עבור מקומות שונים (כולל ספירות תנועת הולכי רגל) על-פי השיטות שתוארו במחקר זה. בנוסף, ככל שתשתפר רמת הדיוק ותקופתם של מודלים גנריים לתנועת הולכי רגל במגוון רב של שכונות ואזורים עירוניים בישראל, ניתן יהיה לחשב ולאתר מקומות בעלי שיעור סיכון גבוה לאוכלוסיות הפגיעות בצורה מקיפה בהרבה, ואף לעשות שימוש בכלי זה כבר במהלך התכנון.

6. ביבליוגרפיה

1. גייקובס ג'. (2008), "מותן וחייהן של ערים אמריקאיות גדולות", *הוצאת בבל*.
2. הנדל, ל. (2010) "היבטים פסיכולוגיים של היפגעות ילדים וקשישים הולכי רגל", *מרכז רן נאור לחקר בטיחות בדרכים*, כנס "העתיד הולך ברגל", אפריל 2010.
3. הרשות הלאומית לבטיחות בדרכים (2012), "מגמות בבטיחות בדרכים בישראל 2005-2011".
4. וייסמן ר. (2005), "השפעת המרחק על הנגישות לגנים ציבוריים, מקומיים ושכונתיים: המקרה של תל אביב", *עבודת גמר לקראת התואר "מוסמך אוניברסיטה" (בהנחיית י. אומר, אוניברסיטת תל אביב)*.
5. ליפמן, א. (2008), "בטיחות בדרכים והליכה ברגל לבית הספר היסודי", *עבודת גמר לקראת התואר "מוסמך אוניברסיטה" (בהנחיית י. אומר, אוניברסיטת תל אביב)*.
6. לרמן י. (2009), "השלכות מורפולוגיות על התפלגות הולכי רגל במרחב העירוני: המקרה של אזור רחוב אבן-גבירול בתל-אביב", *עבודה שקולת-תזה, (בהנחיית י. אומר, אוניברסיטת תל אביב)*.
7. משרד התחבורה ומשרד הבינוי והשיכון (2012), "הנחיות לתכנון רחובות בערים".
8. Alexander C. (1964), "A City is not a Tree" *Architectural Forum*, (Vol 122, No 1, April 1965, pp 58-62 (Part I), and Vol 122, No 2, May 1965, pp 58-62 (Part II). Available at: <http://www.rudi.net/node/317>, accessed 07 May 2012.
9. Alfonzo M. A. (2005), "To walk or not to walk? The hierarchy of walking needs", *Environmental Behavior Vol. 37*.
10. Appleyard D. (1981), "Livable Streets", *Berkeley, CA: University of California Press*.
11. Batty M. (2005), "Cities and complexity: understanding cities with cellular automata, agent-based models, and fractals", *Cambridge, Mass; MIT Press*.
12. Barton B., Ulrich T. and Lyday B. (2011), "The roles of gender, age and cognitive development in children's pedestrian route selection", *Child: care, health and development, Vol. 38.2*.
13. Batty M. (2005), "Cities and complexity: understanding cities with cellular automata, agent-based models, and fractals", *Cambridge, Mass; MIT Press*.
14. Batty M. (2009), "Accessibility: in search of a unified theory", *Environment and Planning B: Planning and Design*, 36, 191-194.
15. Borgers A. and Timmermans H.J.P. (1986), "A model of pedestrian route choice and demand for retail facilities within inner-city shopping areas", *Geographical Analysis*, 18, 2: 115-128.
16. Bosselmann P., Macdonald E. and Kronmeyer T. (1999), "Livable streets revisited", *Journal of the American Planning Association* 65 (2): 168-80.
17. Cerin E., Saelens B. E., Sallis J. F. and Frank L. D. (2006), "Neighborhood environment walkability scale: validity and development of a short form", *Medicine and Science in Sports and Exercise Vol. 38*.

18. Cervero R. and Duncan M. (2003), "Walking, bicycling, and urban landscapes: evidence from the San Francisco Bay Area", *American Journal of Public Health*, Vol. 93.9.
19. Cervero R. and Radisch C. (1996), "Travel Choices in Pedestrian Versus Automobile Oriented Neighborhoods", *The University of California Transportation Center*.
20. Chu S. C. H. (2005), "When and why do people walk in the city: the influence of urban elements on time-pattern of pedestrian movement", *6th International Walk 21 Conference in Zurich*.
21. City of Cambridge. (2000), "Cambridge Pedestrian Plan". Available at: http://www.cambridgema.gov/~media/Files/CDD/Transportation/Pedestrian/ped_plan_2000.ashx [Accessed: March 25, 2013].
22. City of Portland. (1998), "Portland Pedestrian Master Plan". Available at: <http://www.portlandoregon.gov/transportation/article/90244> [Accessed March 25, 2013].
23. Desyllas J., Duxbury E., Ward J. and Smith A. (2003), "Demand modeling of large cities: an applied example from London", *UCL Centre for Advanced Spatial Analysis*.
24. Duany A., Plater-Zyberk E. and Speck J. (2000), "Suburban Nation – The Rise of Sprawl and the Decline of the American Dream", *North Point Press, New York*.
25. Dunbar G., Holland C. A. and Maylor E. A. (2004), "Older pedestrians: a critical review of the literature", *Road Safety Research Report. Issue: 37, The Department for Transport (UK)*.
26. Frank L. D., James S. F., Terry C. L., Chapman J. E., Saelens B. E. and Bachman W. (2006), "Many pathways from land use to health: Associations between neighborhood walkability and active transportation, body mass index, and air quality", *Journal of the American Planning Association*, Vol. 72.1 pp. 75-87.
27. Garrad J. (2009), "Active transport: children and young people: an overview of recent evidence", VicHealth, Victoria, Australia.
28. Gehl Architects. (2004), "Towards a Find City for People". Available at: http://www.gehlarchitects.dk/files/pdf/London_small.pdf [Accessed: March 25, 2013].
29. Gehl Architects. (2007), "Public Space and Public Life Survey". Available at: <http://www.gehlarchitects.com/index.php?id=159110#/165357/> [Accessed: April 01, 2013].
30. Gehl J. (1987) "Life Between Buildings", *The Danish Architectural Press*.
31. Gehl J., Kaefer L. J. and Reigstad S. (2006), "Close encounters with buildings", *Urban Design Vol. 11*.

32. Gemzoe L. (2006), "Quality for People: A set of criteria for the design of pedestrian places and networks – with people in mind", *7th International Walk 21 Conference in Melbourne*.
33. Geyer G., Raford N. and Ragland D. (2006), "The Continuing Debate about Safety in Numbers – Data from Oakland, CA", *Transportation Research Board 85th Annual Meeting*.
34. Golledge R. J. and Stimson R. J. (1997), "Spatial Behavior: A Geographic Perspective", *The Guildford Press*.
35. Ha H. and Thill J. (2011), "Analysis of Traffic Hazard Intensity: A Spatial Epidemiology Case Study of Urban Pedestrians", *Computers, Environment and Urban Systems*, Vol. 35.3.
36. Hakkert A.S. and Matar C. (2007), "Country Report for Israel", *Part of the Pedestrians Quality Needs Cost358 Project*.
37. Hillier B. (1996), "Space is the Machine", *Cambridge University Press, Cambridge*
38. Hillier B. (2002), "A theory of the city as object: Or, how spatial laws mediate the social construction of urban space", *Urban Design International*, 7, pp.153-179.
39. Hillier B. and Hanson J. (1984), "The Social Logic of Space", *Cambridge University Press, Cambridge*.
40. Hillier B. and Iida S. (2005), "Network effects and psychological effects: a theory of urban movement", *5th International Space Syntax Symposium in Delft*.
41. Hillier B., Penn A., Hanson J., Grajewski T., Xu J. (1993), "Natural Movement: Or, Configuration and Attraction in Urban Pedestrian Movement", *Environment and Planning B: Planning and Design 1993: Vol. 20*.
42. Hillier B., Turner A., Yang T. and Park H. T. (2007), "Metric and topo-geometric properties of urban street network: some convergences, divergences and new results", *6th International Space Syntax Symposium in Istanbul*.
43. Jacobs A.B., Macdonald, E. and Rofè Y. (2002), "The Boulevard Book", *Cambridge, Mass.: MIT Press*.
44. Jacobsen P.L., (2003). "Safety in numbers: more walkers and bicyclists, safer walking" and bicycling. *Injury Prevention*, 9 (3), 205–209.
45. Jiang B. (2009), "Ranking space for predicting human movement in an urban environment", *International Journal of Geographical Information Science*, Vol. 23.7, pp. 823–837.
46. Johnston B. D. (2008), "Planning for child pedestrians: issues of health, safety and social justice", *Journal of Urban Design* Vol. 13.1.

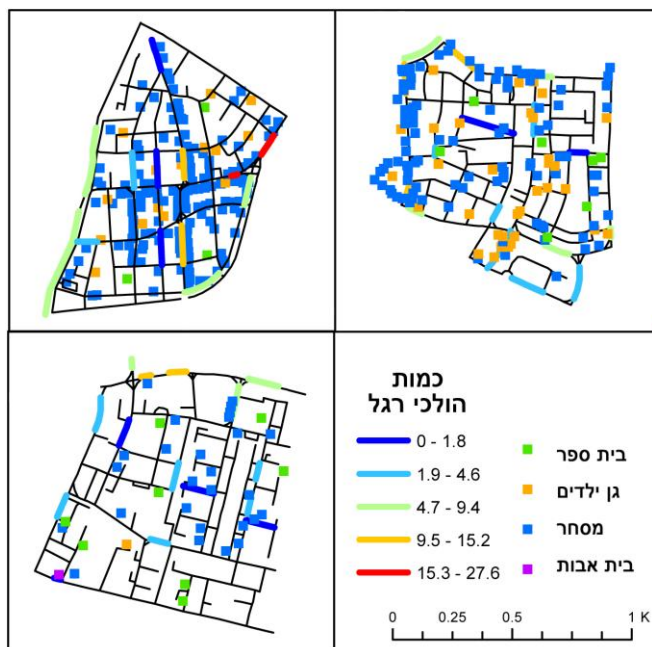
47. Kelly C. E., Tight M. R., Page M. W. and Hodgson F. C. (2007), "Techniques for Assessing the Walkability of the Pedestrian Environment", *8th International Walk 21 Conference in Toronto*.
48. Krizek K. J., Johnson P. J (2006), "Proximity to Trails and Retail: Effects of Urban Cycling and Walking", *Journal of the American Planning Association*, Vol. 72, No. 1, Winter 2006.
49. Lerman, Y. and Omer I. (2013), "The Effects of Configurational and Functional Factors on the Spatial Distribution of Pedestrians", *Geospatial Thinking, Lecture Notes in Geoinformation and Cartography, Springer, Berlin – Heidelberg*.
50. Longley P., and Batty M. (Eds.) (1996), "Spatial analysis: Modelling in a GIS environment Cambridge", UK: *Geoinformation International*.
51. Lynch K. (1960), "The Image of the City", *The MIT Press*.
52. Maguire D., M. Batty M. and Goodchild M. F. (Eds.) (2005), *GIS, Spatial Analysis, and Modeling*, Redlands: ESRI Press.
53. Marshall, S. (2005), *Streets and Patterns*, Spon Press, London.
54. Marshall W. E. and Garrick N. W. (2010), "Street network types and road safety: a study of 24 California cities", *Urban Design International* Vol. 15.3.
55. Matthews H., Limb M. and Taylor M. (2000), "The 'street as thirdspace'", In: Holloway S. and Valentine G. eds., "Children's Geographies: playing, living, learning", *Routledge, London*.
56. McMillan T. (2005), "Urban Form and a Child's Trip to School: The Current Literature and a Framework for Future Research", *Journal of Planning Literature*, Vol 19.4.
57. Methorst R. (2007), "Assessing Pedestrians' Needs: The European Cost 358 PQN Project", *8th International Walk 21 Conference in Toronto*.
58. Moudon A. V., Hess P. M., Snyder M. C. and Stanilov K. (1997), "Effects of site design on pedestrian travel in mixed-use, medium-density environments", *Transportation Research Record*, Vol. 1578.
59. Nelessen A.C. (1994), "Visions for a New American Dream", *Chicago, IL: Planners Press*.
60. Omer, I. and Zafrir-Reuven, O. (2010) Street patterns and spatial integration of Israeli cities. *The Journal of Space Syntax*, 1, pp 280–295.
61. Ozbil A., Peponis J. and Stone B. (2011), "Understanding the link between street connectivity, land use and pedestrian flows", *Urban Design International* Vol. 16, 2, 125–141.

62. Ozer O. and Kubat A.S. (2007), "Walking initiatives: a quantitative movement analysis", 6th *International Space Syntax Symposium in Istanbul*.
63. Raford N. (2003), "Looking both ways: space syntax for pedestrian exposure forecasting and collision risk analysis", 4th *International Space Syntax Symposium in London*.
64. Raford N. and Ragland D. R. (2006), "Pedestrian Volume Modeling for Traffic Safety and Exposure Analysis: Case of Boston, Massachusetts". *Transportation Research Board 85th Annual Meeting*.
65. Read S. (1999), "Space syntax and the Dutch city". *Environment and Planning B: Planning and Design*, Vol. 26, pp. 251–264.
66. Rofè Y. and Omer I. (2012) "How Urban Grids Generate Urbanism – Examples from Israel", in Cavallo R., Komossa S., Bergahuser M. and Marzot N. eds. *New Urban Configurations Proceedings of 2012 EAAE/ISUF Conference*, Faculty of Architecture, Delft Institute of Technology, The Netherlands.
67. Saelens Brian E. and Handy S. (2008), "Built Environment Correlates of Walking: A Review", *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 40(7), 550-566.
68. Saelens B. E., Sallis J. F. and Frank L. D. (2003), "Environmental correlates of walking and cycling: findings from the transportation, urban design and planning literatures", *Annals of Behavioral Medicine*, Vol. 25.2.
69. Schubert W. and Skala F. (2007), "Encouraging walking, the role of urban design: Experiences of the EU-ECOCITY project", 8th *International Walk 21 Conference in Toronto*.
70. Talen E. (2003), "Neighborhoods as service providers: a methodology for evaluating pedestrian access", *Environment and Planning B: Planning and Design 2003*, Vol. 30.
71. Turner A. (2007), "From axial to road-centre lines: a new representation for space syntax and a new model of route choice for transport network analysis", *Environment and Planning B: Planning and Design*, Vol. 34.3, pp. 539-555.
72. Veras A. and Amorim L. (2005), "New Urbanism: ideals and urban configuration", 5th *International Space Syntax Symposium in Delft*.

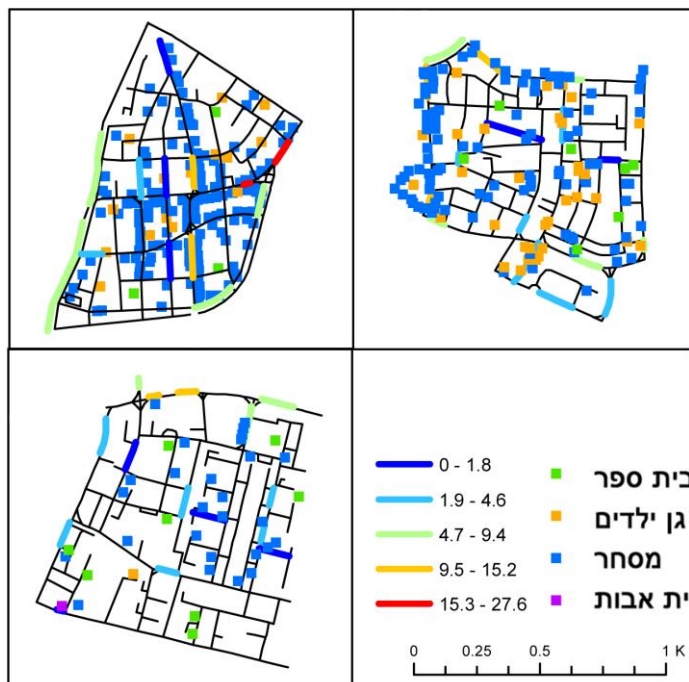
נספחים

נספח 1: שימושי הקרקע והתפלגות תנועת הולכי רגל בעיר בת ים.

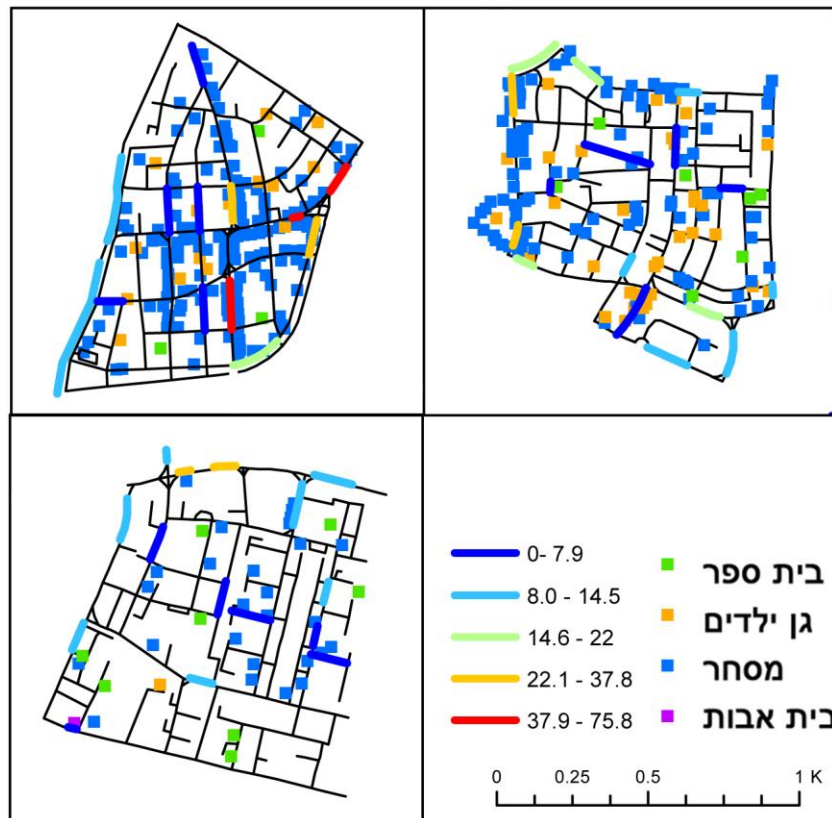
משמאל למעלה ובכיוון השעון: שכונה 1-3



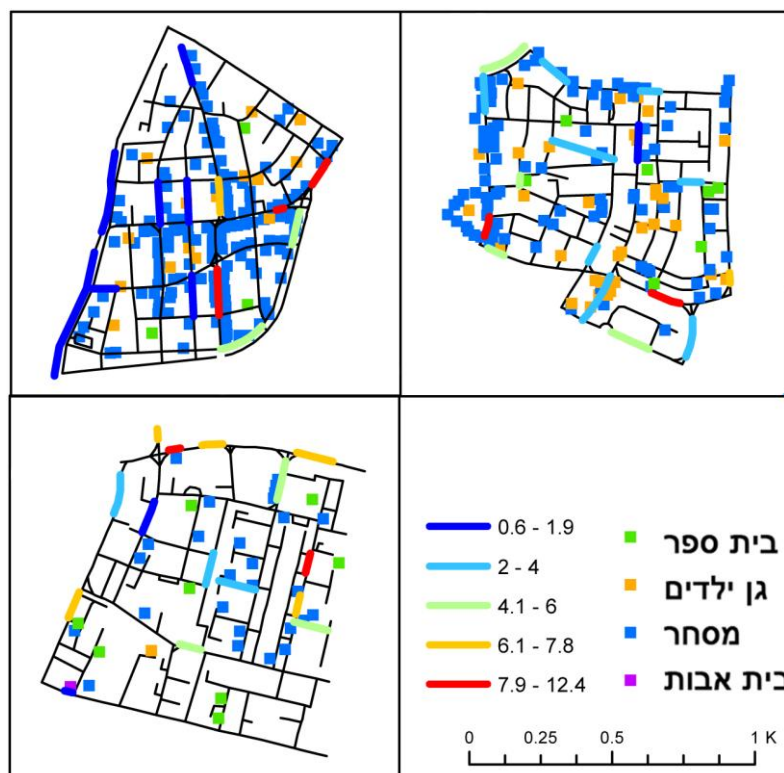
1.1 כמות כלל הולכי הרגל



1.2 כמות הולכי רגל - קשישים



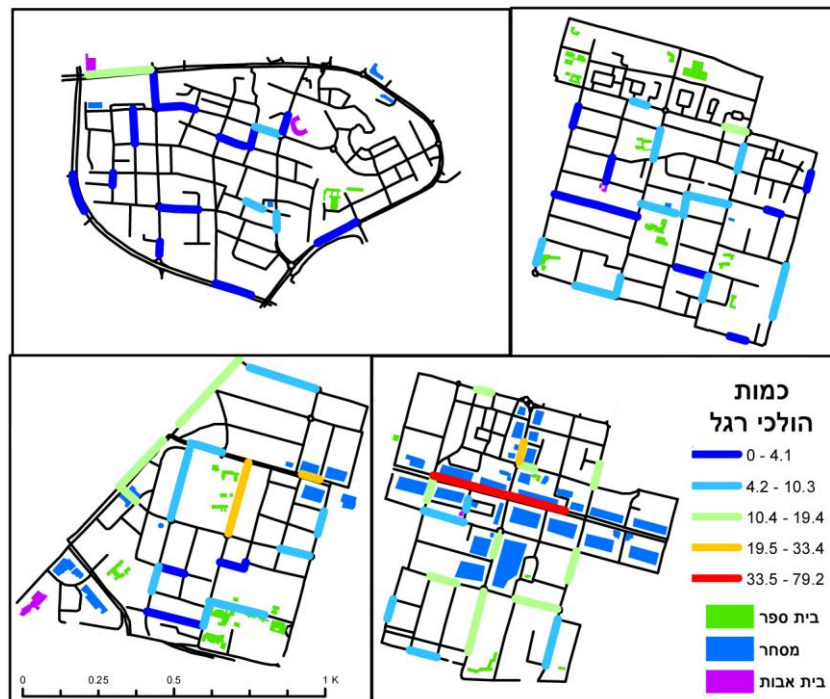
1.3 כמות הולכי רגל – אוכלוסיה בגילאי 15-64



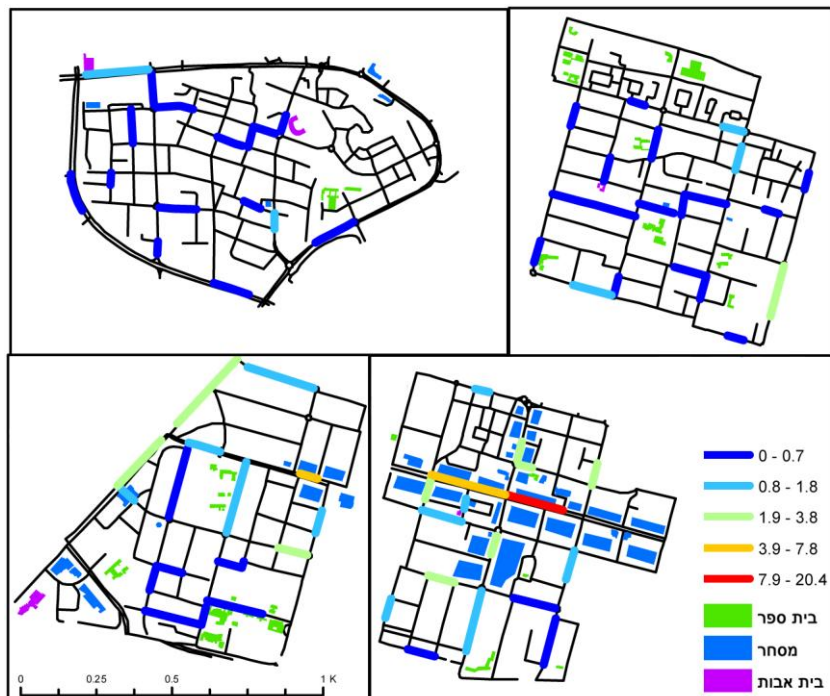
1.4 כמות הולכי רגל – ילדים

נספח 2: התפלגות שימושי הקרקע והתפלגות תנועת הולכי רגל בעיר כפר סבא

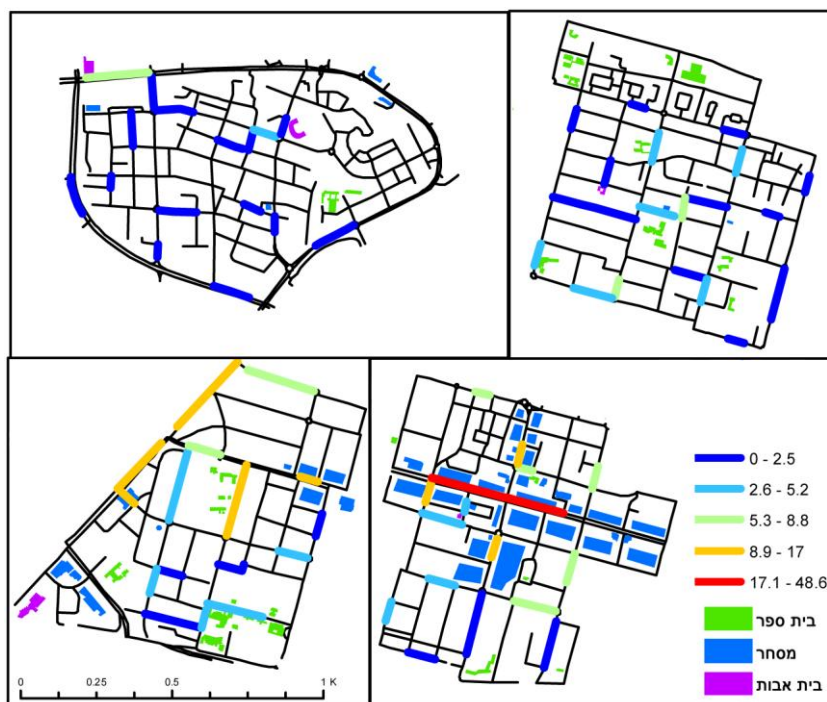
משמאל למעלה ובכיוון השעון: שכונה 1-4



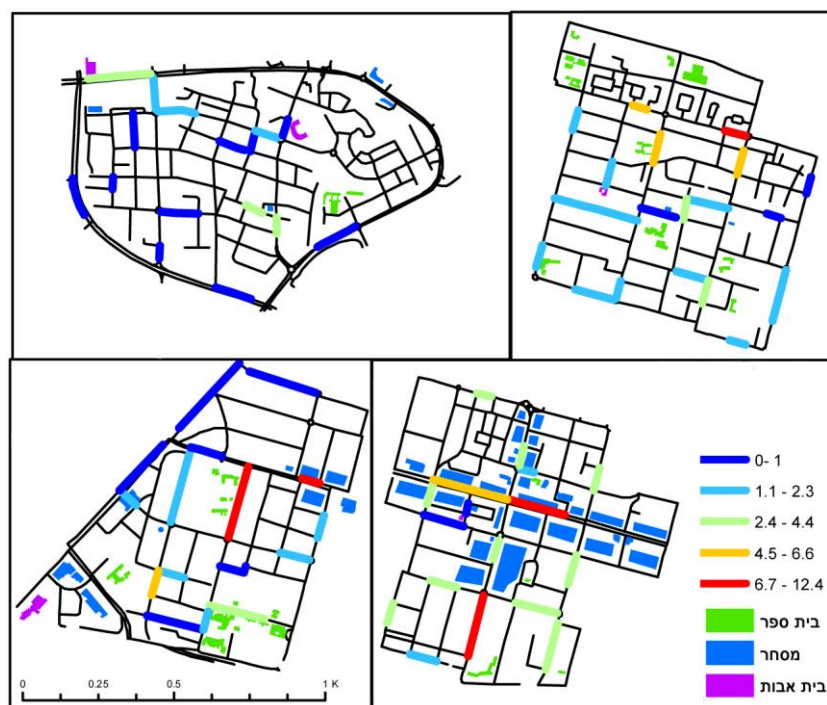
2.1 כמות כלל הולכי הרגל



2.2 כמות הולכי רגל – קשישים



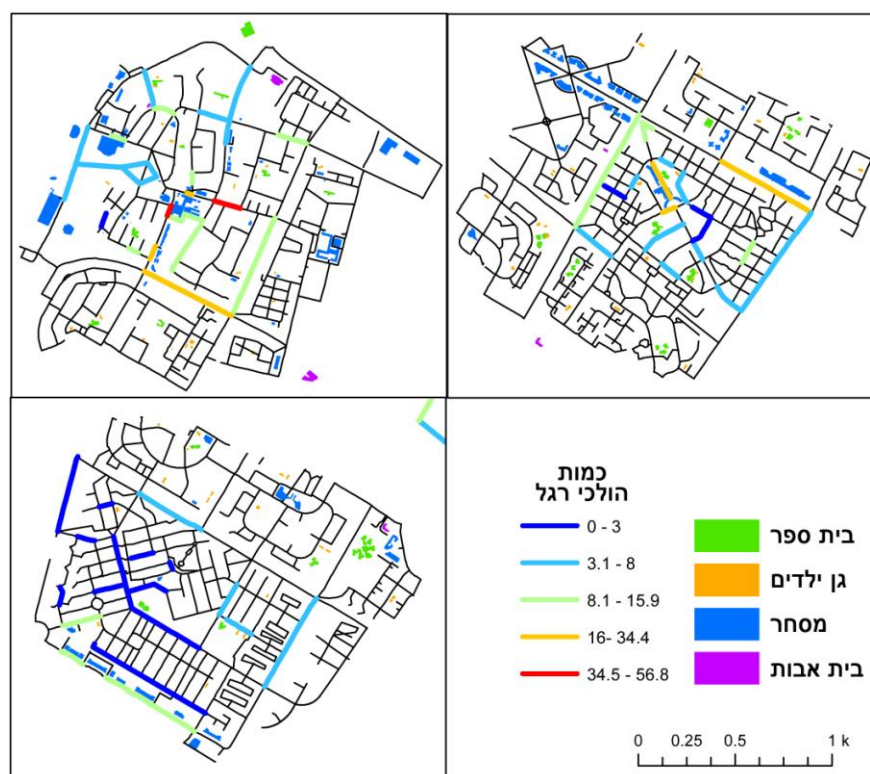
2.3 כמות הולכי רגל – אוכלוסיה בגילאי 15-64



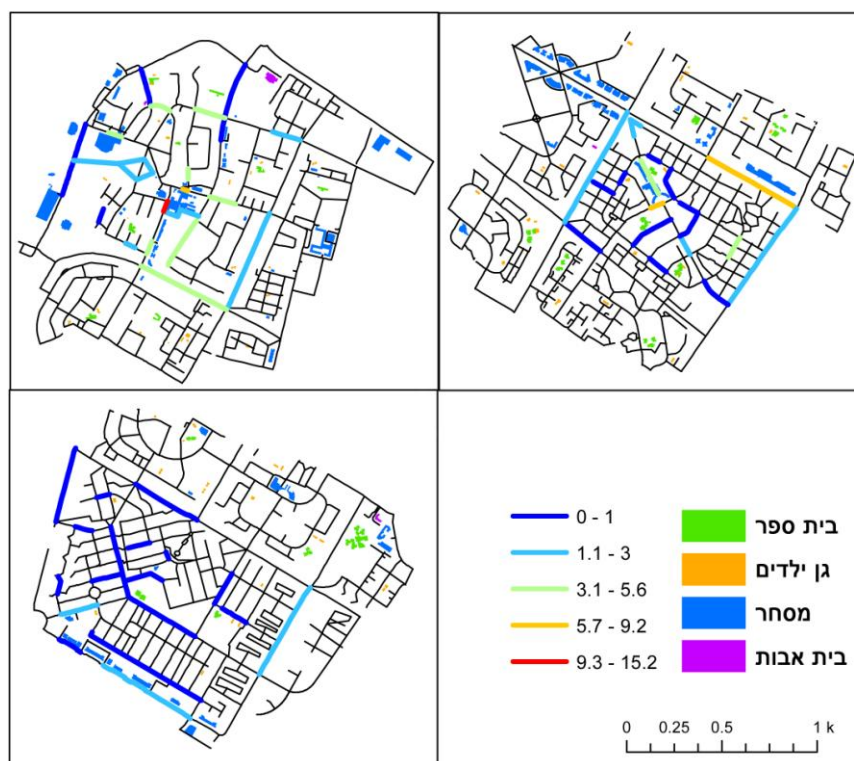
2.4 כמות הולכי רגל – ילדים

נספח 3: התפלגות שימושי הקרקע והתפלגות תנועת הולכי רגל בעיר אשדוד

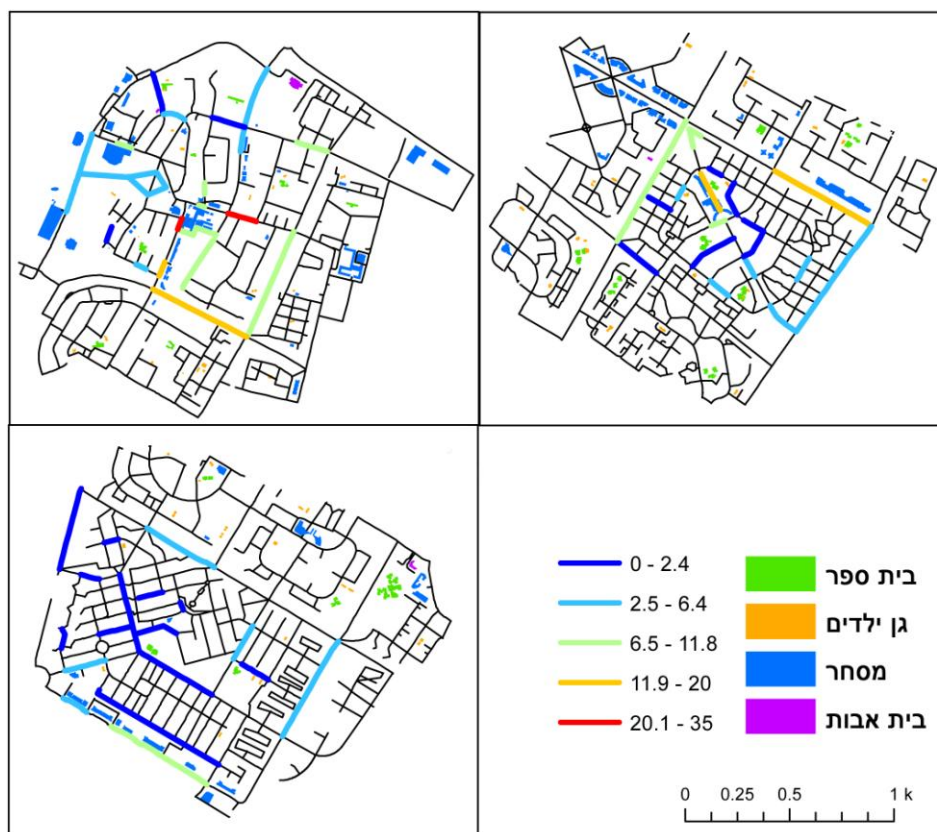
משמאל למעלה ובכיוון השעון: שכונה 1-3



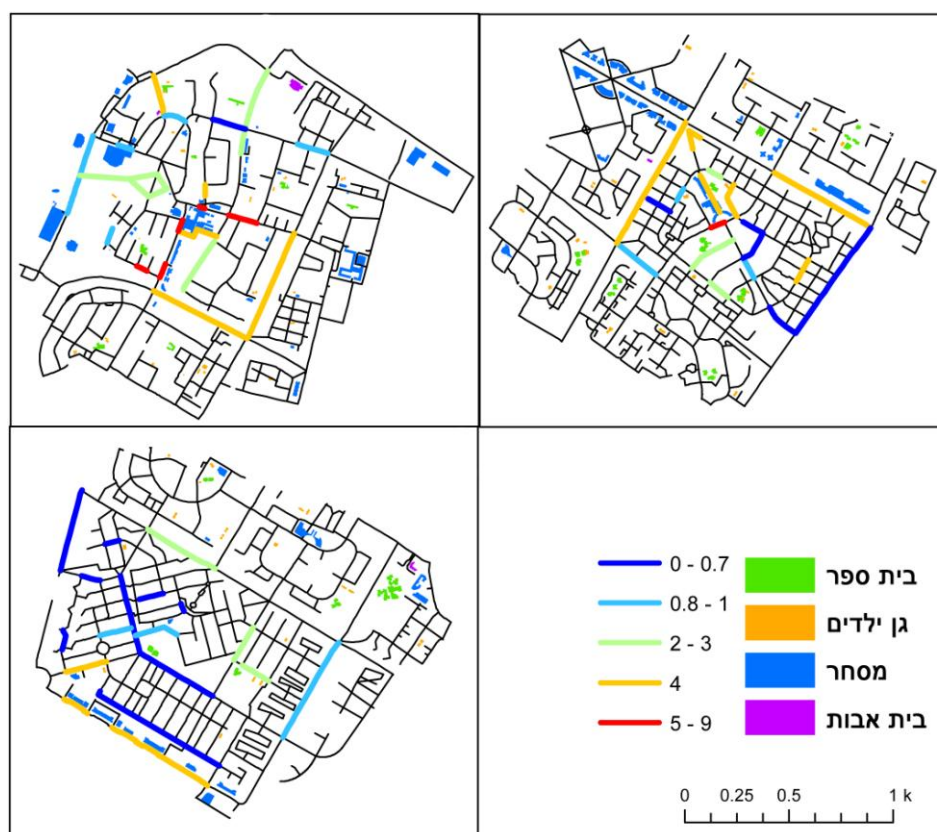
3.1 כמות כלל הולכי הרגל



3.2 כמות הולכי רגל – קשישים



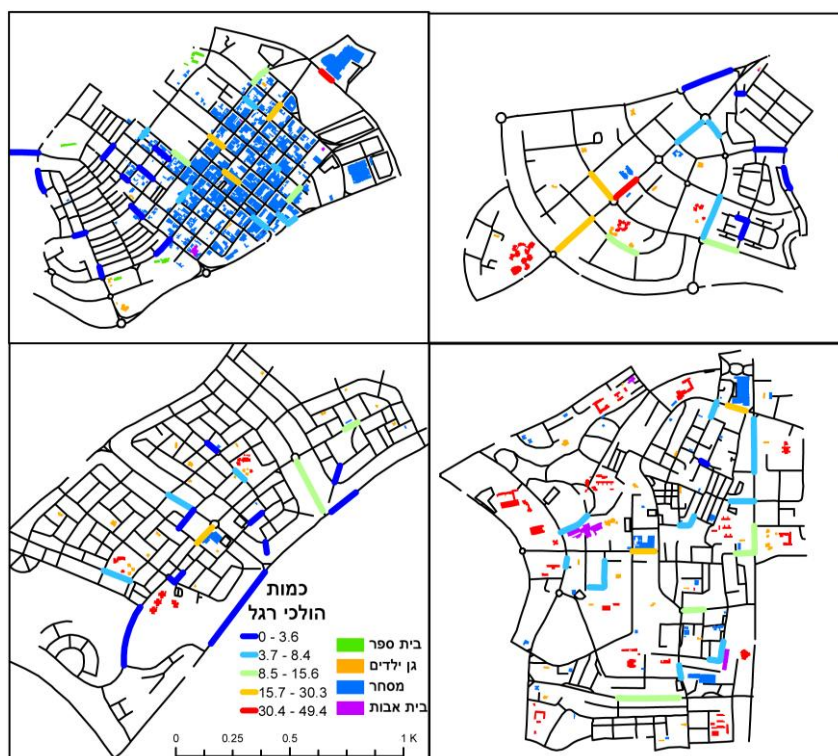
3.3 כמות הולכי רגל – אוכלוסיה בגילאי 15-64



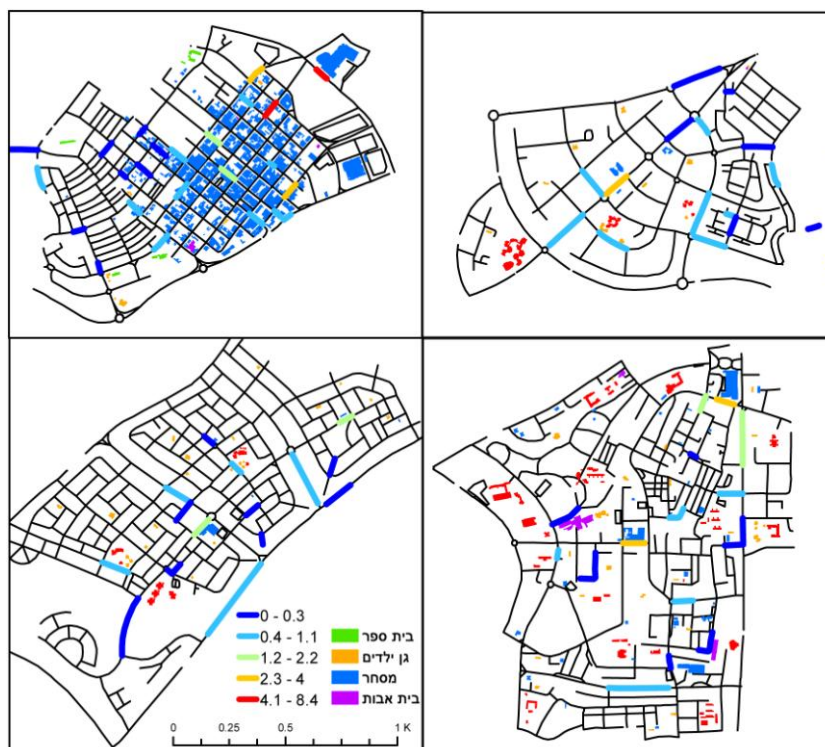
3.4 כמות הולכי רגל – ילדים

נספח 4: התפלגות שימושי הקרקע והתפלגות תנועת הולכי רגל בעיר באר שבע

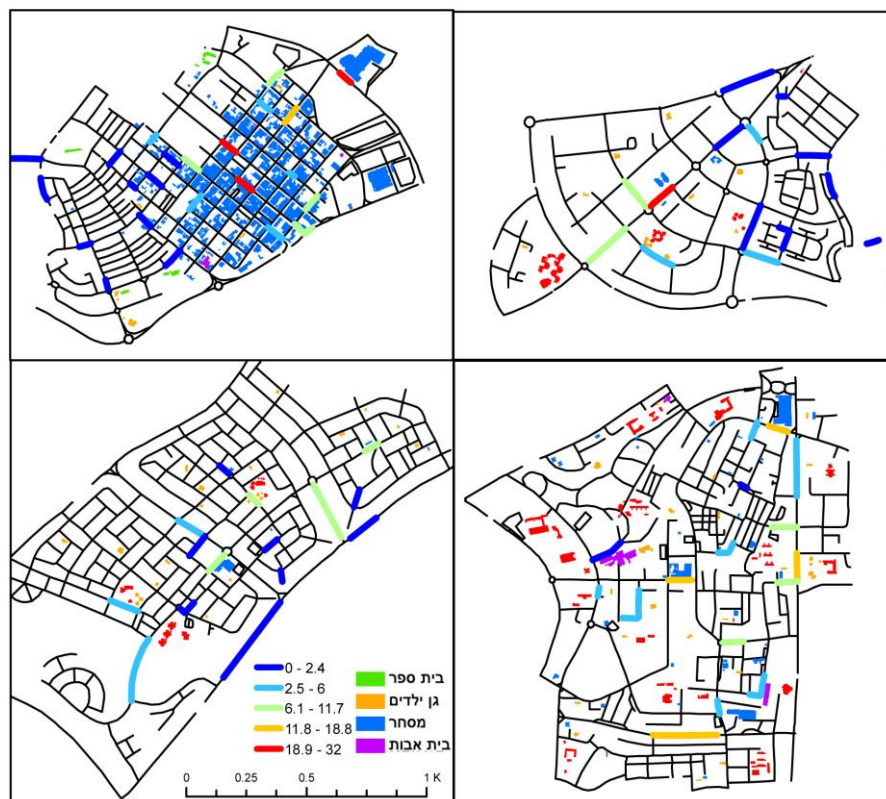
משמאל למעלה ובכיוון השעון: שכונה 1-4



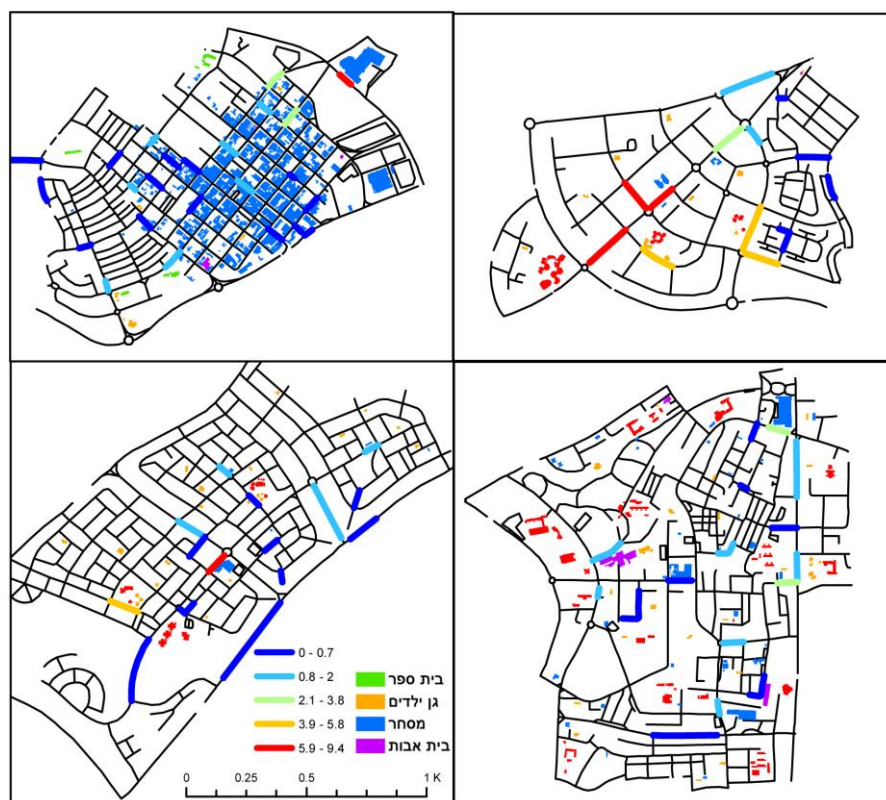
4.1 כמות כלל הולכי הרגל



4.2 כמות הולכי רגל – קשישים



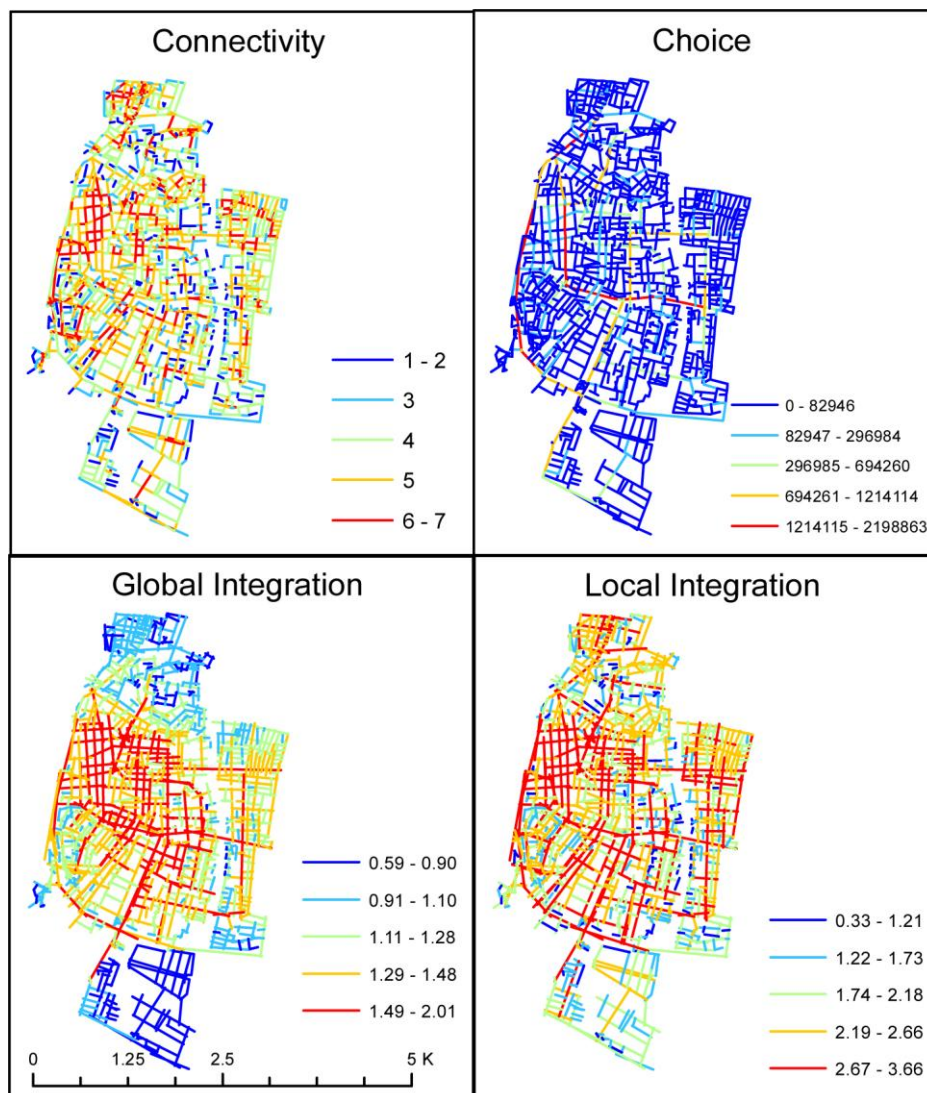
4.3 כמות הולכי רגל – אוכלוסיה כללית



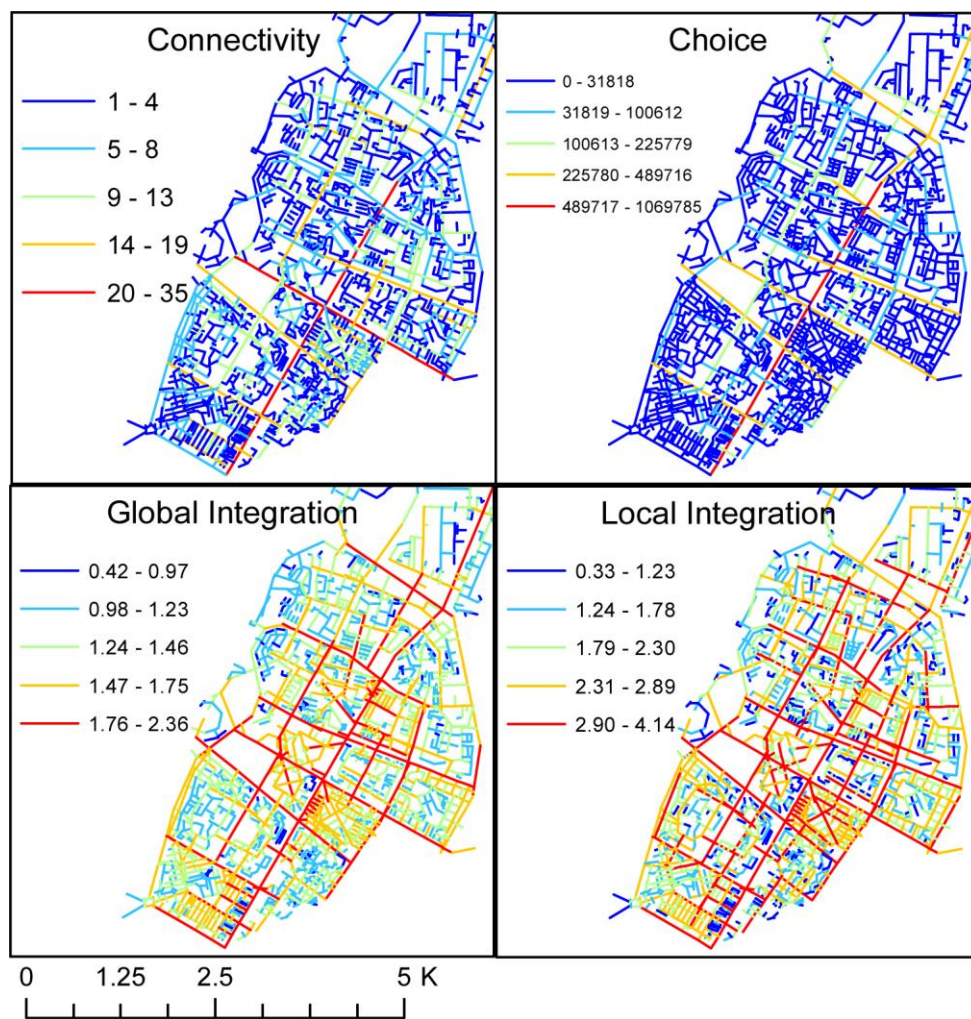
4.4 כמות הולכי רגל – ילדים

נספח 5: מפות מקטעים (segment maps) מבוססות קווי ציר (axial lines)

משמאל-למעלה ובכיוון השעון: קישוריות, בחירה, אינטגרציה מקומית, אינטגרציה גלובלית



5.1 בעיר בת ים



5.2 בעיר אשדוד

נספח 6: ערכי מודל הרגרסיה על פי טיפוס שכונה (C,B,A) ועל פי קבוצות אוכלוסיה (רשימת המשתנים מופיעה טבלה 4.4.2).

C				B				A				כלל האוכלוסיה
Beta	Sig	Se	B	Beta	Sig	Se	B	Beta	Sig	Se	B	
	0.218	4.3	5.33		0	35.869	-234.583		0.124	6.863	-10.764	CONST
				-.596	0	0.149	-0.699	-.223	0.001	1.062	-4.003	StreetGrid
0.413	0	0.163	0.901	.234	0	0.105	0.395	.416	0	0.107	0.699	SegComFront
								.155	0.022	0.243	0.578	SegEldFront
0.127	0.095	0.261	0.439	.225	0	0.131	0.498	.360				SegSchFront
0.324	0.005	0.023	0.065	-.655	0.009	0.021	-0.058					AxCon
0.857	0.084	1.479	2.583	1.914	0	1.818	8.212					Integ
				1.761	0	0.559	2.737	.360	0.027	0.342	0.784	IntegR3
-1.120	0.068	5.98	-11.024									Intensit
-0.266	0.016	0.845	-2.065	7.157	0	7.159	43.595					IntenR3
				2.516	0	0.761	3.813	1.302	0.003	0.168	0.523	AxMD
				7.517	0	10.109	62.296	.252	0.044	1.452	3.012	AxMDR3
								.820	0	3.834	15.616	MD
								.251	0	0.453	1.74	MDR250
0.361	0.027	4.379	9.834	.482	0.006	2.799	8.155					MDR2500
0.262	0.03	1.676	3.694									MDR750
-0.212	0.013	0	0	.266	0.057	0	0.001					MMD
												MMDR250
-0.177	0.087	0.002	-0.003	.409	0.001	0.001	0.005					MMDR2500
												MMDR750
												L_Choice
												L_ChoiceR3
0.450	0	0.024	0.122	.314	0.004	0.01	0.031	1.049	0.003	0.044	0.138	TOT_DEN_S
-0.232	0.006	0	0	-.220	0.006	0	0	-.665	0	0	-0.001	TOT_AB_PO_S
								.177	0.028	0.989	2.252	MDR500
				.222	0.003	0.002	0.008					MMDR500
-0.419	0.011	3.48	-9.028									MDR1500
				-.281	0.009	0.002	-0.006					MMDR1500
												MDR4000
0.226	0.089	0.001	0.001	-.506	0	0.001	-0.003					MMDR4000
	0.472				.844				.842			R ²

		C				B				A		קטגוריות
Beta	Sig	Se	B	Beta	Sig	Se	B	Beta	Sig	Se	B	
	0.083	2.505	4.398		0.798	2.691	0.694		0.789	4.676	-1.261	CONST
				-.549	0	0.155	-0.946	-.169	0.013	1.321	-3.452	StreetGrid
0.319	0	0.152	0.711	.202	0.004	0.165	0.499	.377	0	0.136	0.727	SegComFront
				-.129	0.057	0.518	-1.008	.179	0.016	0.3	0.76	SegEldFront
												SegSchFront
0.308	0.005	0.023	0.066					.421	0.043	0.033	0.07	AxCon
1.821	0	1.215	5.71									Integ
								.778	0.017	0.794	1.992	IntegR3
-2.905	0	5.046	-29.582					-1.341	0.005	3.737	-11.028	Intensit
								-.800	0	1.687	-8.226	IntenR3
-0.840	0.001	0.112	-0.37					1.530	0.009	0.26	0.716	AxMD
												AxMDR3
								3.251	0	12.968	71.895	MD
0.148	0.059	0.289	0.553	.155	0.033	0.59	1.297	.273	0	0.572	2.231	MDR250
0.423	0.001	3.352	12.111									MDR2500
0.419	0.016	2.539	6.257									MDR750
				.452	0	0	0.002					MMD
0.128	0.069	0.004	0.008	.152	0.043	0.007	0.014					MMDR250
												MMDR2500
												MMDR750
				.314	0	0.04	0.176	-.241	0.08	0.102	-0.183	L_Choice
												L_ChoiceR3
0.391	0	0.022	0.111	.270	0.004	0.013	0.039	1.048	0.007	0.056	0.159	TOT_DEN_S
-0.161	0.048	0	0					-.396	0.032	0	0	TOT_AB_PO_S
-0.508	0.002	1.668	-5.404									MDR500
												MMDR500
												MDR1500
												MMDR1500
								-1.601	0.005	11.883	-35.663	MDR4000
				-.463	0	0.001	-0.005					MMDR4000
0.604				0.779				0.836				R^2

	C		B		A	ילדים
--	---	--	---	--	---	-------

Beta	Sig	Se	B	Beta	Sig	Se	B	Beta	Sig	Se	B	
	0.732	3.624	-1.245		0.245	2.276	-2.674		0.021	50.76	-121.93	CONST
								-.252	0.004	1.462	-4.523	StreetGrid
0.276	0.001	0.18	0.589	.272	0.009	0.163	0.441	.168	0.06	0.146	0.283	SegComFront
0.266	0.002	0.275	0.888	.208	0.037	0.207	0.442					SegEldFront
												SegSchFront
1.079	0.042	1.549	3.196									AxCon
								1.322	0	0.572	2.911	Integ
-0.993	0.097	5.749	-9.626									IntegR3
								2.492	0.056	11.09	21.905	Intensit
								2.334	0	0.225	0.957	IntenR3
								3.038	0.026	15.81	36.622	AxMD
								.808	0.005	5.319	15.721	AxMDR3
								.515	0	0.612	3.572	MD
0.458	0.021	2.704	6.352					-.287	0.038	1.877	-4.045	MDR250
-0.211	0.018	0	0									MDR2500
												MDR750
												MMD
-0.190	0.054	0.002	-0.003	.488	0.001	0.002	0.006	-.200	0.09	0.002	-0.003	MMDR250
				.608	0	0.045	0.206					MMDR750
0.478	0	0.025	0.131					1.855	0	0.059	0.252	L_Choice
0.176	0.057	0	0					-.867	0	0	-0.001	L_ChoiceR3
-0.368	0.039	1.723	-3.614									TOT_DEN_S
												TOT_AB_PO_S
												MDR500
								-.275	0.001	0.004	-0.013	MDR500
												MMDR500
								.268	0.008	0.003	0.007	MMDR1500
				-.323	0.03	2.793	-6.212					MMDR1500
0.347	0.011	0.001	0.002	-.430	0.003	0.001	-0.003					MDR4000
												MMDR4000
0.399				.439				0.754				R^2

Abstract

The goal of this research was to build a model explaining and predicting the distribution of pedestrian traffic in a city or a neighborhood, with an emphasis on elderly residents and children, which are the two most vulnerable pedestrian populations. The model is based on variables that describe the configuration of the urban street network, relevant land-uses that induce pedestrian traffic, and demographic statistics. In order to build the model, we chose 14 neighborhoods from 4 cities in Israel. We gathered data and performed a sample count of pedestrians according to the various population categories. A multi-variable regression model was built, in order to explain the distribution of pedestrian traffic in the neighborhoods. In the last phase of the research we validated the model by using it to predict pedestrian traffic in 4 additional neighborhoods, and compared the results of the model with the actual traffic measured in those neighborhoods.

The results showed that it is impossible to build a single model for all Israeli cities, as each neighborhood requires a separate model. In general, with the exception of Beer-Sheva, the variables that describe the centrality and spatial integration of street segments predicted the pedestrian traffic distribution more accurately than land-use variables. This is true for all population segments, and especially for children. However, while the models succeed in predicting pedestrian traffic within the adult and elderly populations (correlation values R^2 between 0.5 and 0.8), children's movement seems to be less predictable, and the models' correlation with child pedestrian traffic was significantly lower (R^2 between 0.2 and 0.4). Moreover, we have identified three types of neighborhoods that significantly influence the distribution of pedestrian traffic and the ability to predict its behavior: neighborhoods in city centers and at the edges of the city that were constructed using pre-modern planning methods and have generally well-connected street grids; and modern-designed neighborhoods characterized by hierarchical and dendritic street layouts and an internal commercial center. The model that we developed was able to predict well the movement of adults and the elderly in pre-modern neighborhoods, both in the center and the edge of cities (correlation R^2 between 0.78 and 0.84), but was less successful at predicting children's movement (R^2 of 0.75 for city centers, and 0.44 for pre-modern neighborhoods at the edge of the city). The model works less well in predicting pedestrian traffic distribution in modern neighborhoods (R^2 of 0.47 for adults, 0.60 for elderly and 0.40 for children).

In the model validation phase of the research, we found that the model accurately predicted the pedestrian traffic for all population groups in central neighborhoods of pre-modern cities (Pearson correlations between 0.53 and 0.77), but we were unable to achieve accurate predictions of traffic in neighborhoods at the edge of both types of cities. Further research is necessary to examine whether this inability to predict movement is a result of the significantly lower pedestrian volumes measured in peripheral neighborhoods, of other variables not accounted for in our research, or simply the result of higher degrees of freedom, and therefore less predictability in those areas.

From the applicability perspective, for predominantly Jewish-secular cities with no major topography differences it is possible to build a generic pedestrian traffic model for city center neighborhoods which were built based on pre-modern planning methods, using the geographic information on roads network, land use and demography, which are available for all cities in Israel. Such a model can help in identifying correlations between places that have high presence of elderly and children pedestrians and places that lack in their pedestrian inclusiveness and are hazardous with regard to traffic. Such identification can help and encourage taking actions that take into consideration the physical and cognitive limitations of elderly and children in an attempt to lower their vulnerability.



A Prediction Model for Pedestrian Movement in Urban Space



- Prof. Itzhak Omer
Tel Aviv University
- Dr. Yodan Rofe
Ben-Gurion University of the Negev

Scientific management: Dr. Shay Soffer, Chief Scientist, National Road Safety Authority
Research management: Research Division, National Road Safety Authority

December 2013



A Prediction Model for Pedestrian Movement in Urban Space



- Prof. Itzhak Omer
Tel Aviv University
- Dr. Yodan Rofe
Ben-Gurion University of the Negev

Scientific management: Dr. Shay Soffer, Chief Scientist, National Road Safety Authority
Research management: Research Division, National Road Safety Authority

December 2013